

Stadsträds transmissivitet av direkt solstrålning

En studie i fyra stadsträds optiska vinteregenskaper för en del av en hållbar klimatplanering



Annika Larsson

Självständigt arbete vid LTJ-fakulteten, SLU

Examensarbete inom programmet Hållbar stadsutveckling –
ledning, organisering och förvaltning

2011

Stadsträds transmissivitet av direkt solstrålning: En studie i fyra stadsträds optiska vinteregenskaper för en del av en hållbar klimatplanering

The transmissivity of direct sunlight among urban trees: A study of the optical characteristics of four urban trees during winter for a part of a sustainable climate planning

Annika Larsson

Handledare:	Henrik Sjöman, institutionen för landskapsutveckling, SLU
Examinator:	Tim Delshammar, institutionen för landskapsutveckling, SLU
Biträdande examinator:	Mats Gyllin, institutionen för arbetsvetenskap, ekonomi och miljöpsykologi, SLU
Externa handledare:	Sofia Thorsson, stadsklimatgruppen, institutionen för geovetenskap, Göteborgs universitet Fredrik Lindberg, stadsklimatgruppen, institutionen för geovetenskap, Göteborgs universitet

Omfattning: 30 hp

Nivå och fördjupning: avancerad nivå, master (A2E)

Kurstitel: Självständigt arbete i hållbar stadsutveckling

Kurskod: EX0625

Program/utbildning: Hållbar stadsutveckling – ledning, organisering och förvaltning

Fakultet: LTJ – Fakulteten för landskap, trädgård och jordbruk

Utgivningsort: Alnarp

Utgivningsår: 2011

Serie: Självständigt arbete vid LTJ-fakulteten, SLU

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: stadsträd, mikroklimat, värmeö, transmissivitet, klimatplanering, stadsplanering, solstrålning, avlövat, vinter



Sveriges lantbruksuniversitet
Landskapsplanering

Alnarp

Förord

Det här är en masteruppsats i ämnet landskapsplanering vid SLU, Alnarp. Arbetet är en del i masterprogrammet Hållbar stadsutveckling - ledning, organisering och förvaltning och omfattar 30 hp samt är av fördjupning A2E. Huvudhandledare vid SLU har varit Henrik Sjöman, examinator Tim Delshammar och biträdande examinator Mats Gyllin. Externa handledare har varit Sofia Thorsson och Fredrik Lindberg vid stadsklimatgruppen på Göteborgs universitet.

Det här är ett tvärvetenskapligt arbete. Just tvärvetenskaplighet är något som krävs för utvecklingen av resilienta boende- och livsmiljöer. Min egen bakgrund är efter naturvetenskapligt gymnasium och några kurser i fysisk planering en yrkesutbildning till Landskapsingenjör vid SLU, Alnarp med kunskaper i anläggning och drift av utemiljöer. Mitt specialintresse är användning av växtmaterial för högre livskvalitet och däribland artval, växtförutsättningar, mikroklimat, hälsa och planering av gröna miljöer i staden. Intresset för klimatplanering väcktes på allvar när jag skrev examensarbete inom landskapsingenjörsprogrammet då jag studerade förändrade klimatvillkor för växtlighet i och med den globala uppvärmningen. Efter att ha gått den fristående kursen "Urbant klimat och hållbar utveckling av byggd miljö" vid Lunds Tekniska Högskola var intresset kvar för att stanna. Under tiden på masterprogrammet har jag alltid haft klimatplanering i åtanke även om andra aspekter av hållbar utveckling också intresserar mig. Användning av vegetation och då i synnerhet stadsträd för mikroklimatplanering i stadsmiljö är en naturlig avslutning på mina studier som knyter ihop säcken på många sätt.

Uppsatsen är skriven på ett grundläggande sätt och är riktat till stadsplanerare och landskapsarkitekter och andra som på något sätt arbetar med stadsmiljöer och kan ha intresse av att förstå hur träd påverkar mikroklimatet i en hårdgjord miljö.

Jag vill rikta ett jättestort tack till mina underbara handledare Sofia Thorsson, Fredrik Lindberg och Henrik Sjöman som gett mig så mycket stöd och tid under arbetets gång. Tack till stadsklimatgruppen som initierade det här arbetet och kom med idén att undersöka stadsträds transmissivitet av direkt kortvågig strålning. Tack för att jag fått möjlighet att vara en del av er forskning och för att ni så öppen hjärtat låtit mig vara en del av gruppen! Utan er hade det här arbetet aldrig blivit vad det är. Tack också till älskade Johan som alltid funnits där med stöd och uppmuntran.

Göteborg den 16 juni 2011

Abstract

Climatic adaptation of the built environment is a prerequisite for sustainable cities. This is especially true now that the climate is changing. Vegetation can help to reduce the maximum temperatures in the city and reduce the urban heat island. City trees is one type of vegetation that can do this by shading urban materials. In our northern cold climate, we will continue to have a need for heating during winter months and trees can then have a negative impact on the experience of temperature even if they are leafless. This thesis is a study of urban trees permeability, so-called transmissivity, of direct sunlight in winter. The direct radiation is the type of radiation that is affecting the heating of the urban materials the most.

Previous studies show that the transmissivity of deciduous species during summer is about 5-15% of incoming radiation. This study has been performed on four individual urban trees in Gothenburg city, including three deciduous trees during March and April. Total and diffuse radiation was measured above and under the tree canopies and the direct radiation was calculated. The difference between the results above and below the crown was assumed to be the transmissivity. The results show that the transmissivity in the winter period is as low as about 50%. After modeling in the climate model SOLWEIG and calculations of the climate index PET (Physiological Equivalent Temperature) it can be concluded that the degree of transmissivity has a profound effect on human thermal comfort.

The conclusions are that trees can have a negative impact on thermal comfort outdoors during the winter when they may be shadowing seatings that need to be warm in order to be used. It also affects the heating needs indoors during winter when the trees are planted to shade windows during summer. Various deciduous trees seem to have a similar transmissivity in the winter, but the differences are assumed to increase when they gain leaves because the leaf characteristics and how leaves are set greatly affect transmissivity, and these characteristics varies between species. This study may shed light on how urban trees affect the urban microclimate and thermal comfort. Further studies are required in order to compare different species. It is also interesting to study further how transmissivity differs between winter and summer, and possibly examine how leaf area index can be linked to the transmissivity.

Sammanfattning

Klimatanpassning av byggd miljö är en förutsättning för hållbara städer. I synnerhet gäller detta nu då klimatet är i förändring. Vegetation kan bidra till att sänka de högsta temperaturerna i staden och minska den urbana värmeön. Stadsträd är en typ av vegetation som genom beskuggning kan bidra med detta. I vårt nordliga kalla klimat kommer vi dock fortsatt att ha ett uppvärmningsbehov under vintermånaderna och träd kan då ha en negativ påverkan på temperaturupplevelsen även om de är avlövide. Det här arbetet är en studie i stadsträds genomsläpplighet, så kallad transmissivitet, av direkt solstrålning vintertid, då de lövfällande träden är avlövide. Den direkta strålningen är den som påverkar uppvärmningen av stadens material mest.

Tidigare studier visar att transmissiviteten hos lövade lövfällande arter är omkring 5-15 % av inkommande strålning. Denna studie är gjord på fyra individuella stadsträd i Göteborg stad, varav tre lövfällande under mars och april månad. Total och diffus strålning mättes ovan och under träden och den direkta strålningen räknades ut. Skillnaden mellan resultaten ovan och under kronan antogs vara transmissiviteten. Resultaten visar att transmissiviteten under den lövfria perioden är så låg som ca 50 %. Efter modelleringar i klimatmodellen SOLWEIG samt beräkningar av klimatindexet PET (eng. *Physiological Equivalent Temperature*) så kan det konstateras att trädens grad av transmissivitet har en stor påverkan på människors värmekomfort.

Slutsatserna är att träd kan ha en negativ påverkan på värmekomforten utomhus i avlövat tillstånd då de eventuellt skuggar sittplatser som behöver vara varma för att nyttjas. Det påverkar också uppvärmningsbehoven inomhus vintertid då de har planterats för att skugga fönster under sommaren. Olika lövfällande träd verkar ha en likartad transmissivitet i avlövat tillstånd, men skillnaderna antas öka då de får löv eftersom lövens egenskaper och hur löven sitter påverkar transmissiviteten stort, vilket varierar mellan arter. Den här studien kan kasta ljus över stadsträds klimatpåverkande egenskaper. Ytterligare studier behövs dock för att jämföra olika arter. Det är också intressant att studera vidare hur transmissiviteten skiljer sig mellan avlövat och lövat stadie och eventuellt undersöka hur bladytindex kan kopplas till transmissiviteten.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte.....	2
1.3	Frågeställningar.....	2
1.4	Avgränsningar	2
2	Teori	4
2.1	Strålningens påverkan på klimatet.....	4
2.2	Stadens klimat.....	6
2.3	Människans perception av klimatet	8
2.4	Vegetationens påverkan på mikroklimatet.....	9
2.5	Transmissivitet hos vegetation	10
2.6	Matematiska modeller av vegetation.....	18
3	Metod.....	19
3.1	Design	19
3.2	Instrument	19
3.3	Träden.....	20
3.4	Himmelsexponeringsfaktor.....	20
3.5	SOLWEIG	21
3.6	RayMan.....	22
3.7	PET	23
3.8	Analys.....	23
4	Studieområde	24
5	Resultat.....	29
5.1	Transmissivitet vintertid för olika arter	29
5.2	Himmelsexponeringsfaktorn - SVF	36
5.3	Skillnad i transmissivitet mellan sommar och vinter.....	37
5.4	Transmissivitetens effekt på strålningstemperatur och PET	37
6	Diskussion.....	47
6.1	Resultatdiskussion	47
6.2	Studiens betydelse	49
7	Slutsatser	52
7.1	Vidare forskning	52
8	Källförteckning.....	53

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Klimatförändringens verkan är numera mer eller mindre ett allmänt faktum. SMHI har tagit fram två klimatscenarier för perioden 2011-2100 (SMHI, 2007). De är framtagna med hjälp av modeller baserade på statistiskt underlag och möjliga framtida förändringar i atmosfären. De visar att vi i hela Sverige kan räkna med en förhöjd årsmedeltemperatur med knappt fyra grader till drygt fem grader fram till år 2100 och i Sveriges södra och östra delar beräknas en årlig värmebölja¹ börja inträffa inom perioden (SMHI 2007). Detta påverkar dels det så kallade makroklimatet, dels lokal- och mikroklimatet. Mikroklimatet kallas det marknära klimat som påverkas av vegetation, huskroppar och annat som finns i den omedelbara närheten (Lindqvist et al. 1983) och det är detta som bygger upp stadsklimatet och har visat sig ha stor betydelse för planeringen av våra städer.

Plan- och bygglagen (2 kap. 4 §, avsnitt 3) anger att: "Inom områden med sammanhållen bebyggelse skall bebyggelsemiljön utformas med hänsyn till behovet av hushållning med energi och vatten samt goda klimatiska och hygieniska förhållanden". (SFS 1987:10) I mars 2009 kom propositionerna "En sammanhållen klimat- och energipolitik, klimat" (2008/09:162) och "energi" (2008/09:163). I den förstnämnda diskuteras behovet av en anpassning till det förändrade klimatet. Det visar att man på regeringsnivå har insett behovet av ett klimatanpassningsarbete (Boverket, 2009).

Boverket (2009) har också utkommit med en rapport om morgondagens klimat där de i rapportens sammanfattning konstaterar: "Klimatanpassning av byggande och planering är en viktig förutsättning för att nå en hållbar bebyggd miljö. Men klimatanpassning är inte en miljöfråga på så sätt att naturen ska räddas från oss, utan mer en fråga om hur vi ska rädda oss själva från naturen." (Boverket 2009, s 7) Eliasson et al (2007) visar att mikroklimatet är av mycket stor betydelse för hur vi upplever en plats och hur väl den utnyttjas och att detta är ett starkt argument för att integrera klimatstudier i stadsplaneringen. Gehl (2001) argumenterar också för att lägga större vikt vid mikroklimataspekter i planeringen och menar att ju längre människor uppehåller sig utomhus desto mer träffas de och pratar med varandra. Det är därför jag i detta arbete utgår från människans behov och hur människan uppfattar klimatet.

Den idag gällande stadsbyggnadstrenden är att förtäta för att bland annat minska transporter, vilka släpper ut växthusgaser och bidrar till den globala uppvärmningen. Där man bygger som tätast är dock den urbana värmeöeffekten som störst. (Glaumann & Nord, 1993) Om man vill bygga tätt måste man alltså på något sätt få in naturliga avkylande faktorer. Dimoudi & Nikolopoulou (2003) visade hur vegetation i stadsmiljö effektivt förbättrar mikroklimatet genom att parkmiljöer sänker temperaturen på platsen och i dess absoluta omgivning. Att öka mängden växtlighet i urbana miljöer är därför ett bra sätt att förändra stadsklimatet till fördel för människors välmående. Fullvuxna träd

¹ En värmebölja kallar man vädersituationer med 25 grader varmt eller mer under minst 5 dagar i sträck. (SMHI, 2009d)

spelar en stor roll för mikroklimatet i stadsmiljö i och med dess förmåga att skugga och transpirera i högre utsträckning än till exempel gräs och örter, som snabbt torkar (Gill et al, 2007).

Stadsträd är ur ett klimatperspektiv mycket lite studerade. Skogsklimat samt klimatet i odlingslandskap är studerade i ganska stor utsträckning (se tex. Hardy et al, 2004 eller Gay et al, 1971) medan idén om hur enskilda stadsträd påverkar klimatet är relativt outforskat. Inom ramen för detta examensarbete har jag inte hittat några studier som undersöker stadsträds transmissivitet av den direkta solstrålningen, dvs. genomsläpplighet av direkt solstrålning². Detta är relevant eftersom den direkta, kortvågiga solstrålningen är den som är mest energirik och är den typ av strålning som värmer upp stadens material mest och bör reduceras för ett svalare stadsklimat.

Träd kan dock också ha en negativ effekt på mikroklimatet. Även när lövträd är avlövhade kastar de skugga, som gör att människor upplever temperaturen som lägre. Detta sker under våra kalla årstider vinter och vår, när vi längtar efter värme som mest. Hur stor denna kyleffekt är ska denna studien visa på.

1.2 Syfte

Syftet med uppsatsen är att visa på likheter och skillnader hos transmissiviteten av direkt solljus hos fyra olika stadsträdsarter och betydelsen av detta för en god mikroklimatplanering av urbana miljöer. Den empiriska studien syftar till att ta fram en verklighetsbaserad parameter för stadsträds transmissivitet i avlövad tillstånd för användning i klimatmodellen SOLWEIG och att visa på hur mycket olika träd kan påverka strålningstemperaturen och värmekomforten i Göteborgs stad under vintern. Transmissiviteten under vinterhalvåret, då träden är avlövhade sätts i relation till sommartransmissiviteten, då träden är lövhade och de faktorer som påverkar då.

1.3 Frågeställningar

1. Hur stor är transmissiviteten av direkt kortvågig solstrålning hos hästkastanj (*Aesculus hippocastanum*), skogslind (*Tilia cordata*), vårtbjörk (*Betula pendula*) och svarttall (*Pinus nigra*) då de lövfällande arterna är avlövhade i Göteborg stad?
2. Varierar transmissiviteten av direkt kortvågig strålning mellan dessa ovan nämnda fyra arter?
3. Hur påverkar transmissiviteten av direkt kortvågig solstrålning hos dessa arter den termiska komforten hos människor på dessa undersökta platser?

1.4 Avgränsningar

Arbetet avgränsas till att omfatta endast stadsträd och tar inte upp annan stadsgröniska så som gräs, fasadgröniska, gröna tak mm. Det behandlar heller inte klimataspekter som vind utan studerar bara hur träd kan minska risken för mänsklig värmestress genom sin skuggverkan. Jag avgränsar mig också till att undersöka endast svenska förhållanden. Lokal-, regionalklimatet och andra större

² För en ordlista över i uppsatsen förekommande fackuttryck, se bilaga 1.

klimateffekter som grönska kan utgöra tas heller inte upp. Huvudpoängen med arbetet är att undersöka hur det absoluta närklimatet - det så kallade mikroklimatet - som varierar från en meter till en annan, kan påverkas av stadsträd genom dess transmissivitet, dvs. mängden solinstrålning som släpps igenom.

2 Teori

Detta kapitel är indelat i två delar. Jag inleder med en teoretisk beskrivning av det urbana klimatet där jag introducerar och förklarar relevanta begrepp och uttryck för att förenkla förståelsen av mitt arbete. Denna del är baserad på en litteraturstudie i ämnet. Del två ska ses som huvudbidraget när det gäller bakgrundsteorin och behandlar teorin kring stadsträds optiska egenskaper. Träds transmissivitet i avlöst tillstånd är mycket lite utforskad, men den forskning som finns kring trädstransmissivitet i löst tillstånd kan vara intressant att ha som bakgrund till den här studiens fynd då det gäller transmissiviteten i avlöst tillstånd. Därför innehåller den största delen av detta andra avsnitt kunskap om lövens optiska egenskaper samt transmissiviteten av träd och större trädssamlingar då de är löstade. Träd är mycket speciella föremål i stadsmiljön. De påverkar mikroklimatet på ett helt annat sätt än döda föremål då de andas, växer och genom sin biologiska struktur sprider, absorberar och släpper igenom solens strålar av olika våglängd och i olika mängd. För en ordlista, se bilaga 1.

2.1 Strålningens påverkan på klimatet

2.1.1 Absorption, emission och transmission

Alla föremål och partiklar som har en temperatur över 0 grader Kelvin (den absoluta nollpunkten) eller $-273,15^{\circ}\text{C}$ avger strålning. I praktiken innebär det att allt i vår livsvärld avger strålning. En så kallad svart kropp avger maximal strålning, man säger att dess emissivitet är 1. Kroppar som avger mindre strålning (eg. alla reella föremål), får ett emissivitetsvärde mellan 0 och 1 (Oke, 1987).

Strålning som når ett föremål måste antingen passera genom (transmitteras), reflekteras eller absorberas av kroppen. Energiprincipen låter oss veta att ingen energi försvinner utan bara kan omvandlas.

Alla föremål har specifika egenskaper som tillåter detta i olika mängd och dessa egenskaper kallas transmissivitet, reflektivitet och absorptivitet. Alla föremål har varierande värden på dessa och vad som sker när strålningen når föremålet beror också på strålningens våglängder. För varje temperatur och våglängd är summan av faktorerna 1 (Mattsson, 1979).

Absorptivitet och emissivitet är alltid lika stor, d.v.s. all energi som tas emot och lagras i kroppen strålas också ut igen (Kirchhoffs lag). För en så kallad svart kropp är detta värde 1 (100 %). All strålning absorberas och emitteras, men inget reflekteras från en absolut svart kropp. Så fungerar däremot inte verkliga föremål. De har en reflektivitet mellan 0 och 1 (Oke, 1987). Resterande värde är absorptivitet och emissivitet. Exempel: Ett föremål som belyses med solstrålning reflekterar 30 % av strålningen. Den absorberar resten av strålningen, 70 %, och emitterar sedan lika mycket, d.v.s. 70 %. Föremålets reflektivitet är 0,3; dess absorptivitet är 0,7 och dess emissivitet är 0,7.

Ett föremåls reflektivitet brukar kallas albedo. Emissivitet och albedo för några vanliga stadsmaterial visas i Tabell 1.

Tabell 1 Strålningsegenskaper hos några urbana material efter Oke (1987, s 281).

Yta	Albedo	Emissivitet
Asfalt	0,05-0,20	0,95
Betongväggar	0,10-0,35	0,71-0,90
Träväggar		0,90
Tegeltak	0,10-0,35	0,90
Tak av korrugerat järn	0,10-0,16	0,13-0,28
Vitmålade ytor	0,50-0,90	0,85-0,95
Svartmålade ytor	0,02-0,15	0,90-0,98
Urban miljö i medeltal	0,15	Ca 0,95

Strålning kan också transmittas, dvs. passera genom ett föremål. Glas och is är tydliga exempel.

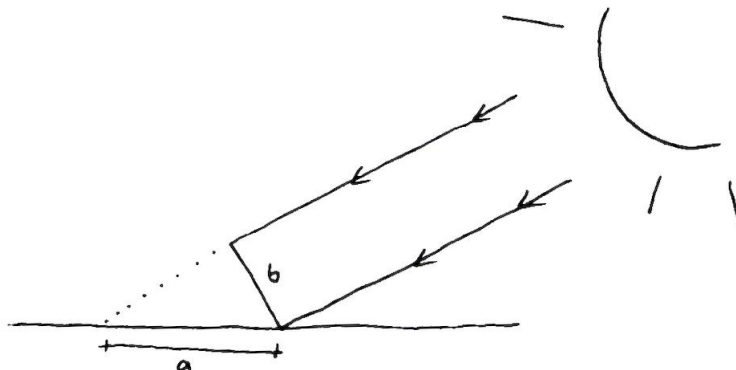
Lachéade et al (2005) redovisar hur olika stadsmaterial reflekterar olika våglängder och det är endast gräs - den enda redovisade vegetationen - vars reflektivitet varierar stort med våglängden. Man kan anta att det i så tjocka och täta material som stadens hårda material inte transmittas någon strålning. Därför absorberas och emitteras sedan den resterande solstrålningen av de hårda materialen. Olika våglängder reflekteras med ungefär samma styrka av dessa hårda material (Lachéade et al, 2005).

2.1.2 Direkt och diffus strålning

Direkt strålning från solen försvagas på väg ner genom vår atmosfär. Den absorberas, emitteras och reflekteras i de partiklar och vattenånga som finns i atmosfären. Spridningen av strålningen består av både reflekterad strålning och transmitterad strålning. Denna strålning som reflekterats och spridits i atmosfären kallas för diffus strålning (Oke, 1987). Moln är effektiva spridare av diffus strålning. Men även solhöjden spelar roll. Ju lägre solen står på himlen desto längre väg har strålningen genom atmosfären. Då ombildas en större del av strålningen till diffus strålning än när solen står högt på himlen (Mattsson, 1979).

Den solstrålning som når jorden utan att reflekteras och spridas i atmosfären kallas direkt strålning. Det är främst denna som värmer upp material på jordytan. Intensiteten i uppvärmningen av en yta bestäms av solens höjd över horisonten. En yta som är vinkelrät mot solen får maximal strålningsenergi per yta och tid, medan en yta som inte är vinkelrät mot solinstrålningen får mindre energi per yta och tid eftersom samma mängd strålning sprids över ett större område (Oke, 1987). Denna energimängd som per ytenhet och träffar en yta kallas irradians, se Figur 1. Det är därför solens strålar känns varmare när vi vinklar upp ansiktet mot solen. Detta gör också att strålningsflödet varierar på olika delar av jorden eftersom strålningens infallsvinkel varierar (Mattsson, 1979).

Vid helt mulet väder elimineras den direkta instrålningen från solen helt och all strålning omvandlas till diffus strålning (Oke, 1987).



Figur 1. Irradiansen beror på strålningens infallsvinkel. I figuren är ytan b mindre än a eftersom den är vinkelrät mot solinstrålningen. Ytan b får därför högre irradians. Illustration författaren.

2.1.3 Kortvågig och långvågig strålning

Den solstrålning som når oss på jordytan är kortvågig (150-3000 nm) (Mattsson, 1979). Ungefär hälften av denna är fotosyntetiskt aktiv strålning (PAR = 380-710 nm), medan hälften är infraröd strålning (NIR) och endast 1 % är ultraviolett strålning (Ross, 1981). Strålningens distribution mellan olika våglängder förändras med höjden i atmosfären eftersom strålningen tunnas ut selektivt i atmosfären. Olika våglängder absorberas mer av atmosfären än andra. Den varierar också med solhöjden då strålningens väg genom atmosfären blir längre vid låga solhöjder. PAR minskar snabbare vid lägre solhöjder än NIR beroende på vattenhalten i luften (Ross, 1981).

Utstrålningen från marken och alla föremål är långvågig (3000-100 000 nm) och den kallar man ibland också för värmestrålning (Mattsson, 1979). Från jordytan emitteras ständigt energi som lågfrekvent strålning. Den större delen av jordens långvågiga strålning absorberas dock av atmosfären och emitteras ner mot jorden igen (Mattsson, 1979). Både kortvågig och långvågig strålning bidrar till att värma upp föremål. Eftersom den kortvågiga strålningen innehåller mer energi så är det den som värmer upp material mest effektivt.

2.2 Stadens klimat

I staden påverkas mikroklimatet av vattenhalt, vegetation, vinkeln på solinstrålningen, höjden på byggnaderna och vidden mellan dem, byggnadsmaterial och material på mark, samt vindriktning och -styrka (Oke, 1987).

2.2.1 Byggnaders påverkan på klimatet

Byggnader påverkar strålning, värme, fuktighet och aerodynamik i en urban miljö. Den största strålningseffekten har beskuggning som effektivt hindrar solstrålning att nå marken. Solbelysta

väggar kan dock reflektera solstrålningen och öka den på andra ställen. Byggnaderna minskar den så kallade himmelsexponeringsfaktorn (eng. *sky view factor*, SVF), vilket skärmar av och minskar utstrålningen av långvågig strålning och håller ytorna varma längre. Värmeförluster i form av långvågig strålning från byggnaderna värmer också upp mark och luft i den absoluta närheten (Oke, 1987). Himmelsexponeringsfaktorn påverkar avkylningen av både urbana och vegetativa ytor. Upmanis et al (1998) undersökte parkers påverkan på det urbana klimatet och menade att både i park och stad spelade SVF en stor roll. Den klimatfaktor som byggnader påverkar mest är dock vinden, men det behandlas inte i det här arbetet.

2.2.2 Den urbana värmeön

Den urbana miljön är vanligen varmare än omkringliggande landskap och därför strålar den ut mer långvågig strålning till atmosfären. Detta sker trots att SVF är lägre här. Om det är mycket föroreningar i luften strålas dock en stor del av den långvågiga strålningen tillbaka mot jorden (Oke, 1987).

Att staden är varmare än kringliggande landskap har lett till användandet av uttrycket "urban värmeö" (eng. *urban heat island*, UHI). Den är en produkt av stadens täthet. Ju tätare bebyggelsen är desto mer avskärmas himmeln och värmeutstrålningen. Fenomenet märks därför främst under kvällen och natten och resulterar i en högre dygnsminimitemperatur i dessa urbana miljöer. Svaga vindar och molnigt väder förstärker denna företeelse. Den starkast påverkande faktorn byggnadstekniskt sett är höjd/bredd-kvoten av gaturummen (eng. *height/width* - H/W). Att använda sig av befolkningstäthet i beräkningar av den urbana värmeön är otillräckligt eftersom det mer är stadens geometri som är avgörande. Man kan också använda sig av SVF. En tät stad fångar lättare upp och stänger in både inkommande kortvågig strålning och utgående långvågig strålning än en gles stad med lägre H/W. Stora parker avbryter det här mönstret, där sikten mot himlen öppnas och utstrålningen tillåts (Oke, 1987).

Den urbana värmeön påverkas mycket av avskärmningseffekten som påverkas av bebyggelsens täthet. Olika markanvändningsregioner får därför ofta olika karaktäristiska yttemperaturnivåer. Luften påverkas av stadsstrukturen och av läget i staden för att stadsstrukturen vanligen är tätare mot centrum. Om bebyggelsen förtätas inom flera kvarter fås en effekt på lufttemperaturen medan om man förtätar ett enstaka kvarter höjs yttemperaturen kraftigt här (Mattsson, Lindqvist & Barring, 1986).

Den urbana värmeön orsakar en längre växtsäsong i staden och en annan fauna än i omkringliggande landskap eftersom djur som gynnas av ett varmare klimat söker sig in till staden. Detta fenomen har också allvarliga konsekvenser. Människor upplever en ökad värmestress på sommaren i varm väderlek, vilket förstärks i dessa urbana miljöer. Staden som värmeö resulterar även i ett minskat behov av uppvärmning vintertid, men ett ökat behov av luftkonditionering av byggnader på sommaren (Oke, 1987). I stadsmiljö är evapotranspirationen lägre för att det finns mindre vegetation och mer för vatten ogenomsläppliga material. Jämför man den urbana miljön med omkringliggande landskap så är det mindre vatten lagrat här. Stadsmiljön har en mycket snabbare avrinning än landsbygden och denna ökar med graden av urbanisering. Detta minskar möjligheterna till avkylning av luften genom evapotranspiration. Stadens luft innehåller dock betydligt fler partiklar än luften

utanför staden och det gör att den inkommande kortvågiga strålningen blir reducerad. Luftföroreningar filtrerar bort de kortaste våglängderna, mest i de ultraviolettera och växtlighet får därmed reducerad förmåga till fotosyntes.

2.3 Människans perception av klimatet

Parametrar som påverkar människans termiska komfort är lufttemperatur, strålningsutbytet, luftfuktighet, aktivitetsnivå och kläder.³ Människans energibudget kan således skrivas som: metabolisk energi + erhållen solstrålning + erhållen strålning från omgivning - värmeförluster genom evaporation - förlorad värmestrålning (Brown & Gillespie 1995).

Som människans evaporation räknas fukten som utsöndras genom utandning, och svettning (ibid). Genom att det går åt energi att omvandla detta till vattenånga får vi en kylande effekt av att svettas. Luftfuktigheten påverkar också människans energibalans genom att det vid mycket höga fukthalter inte är lika lätt för vätska att dunsta. Detta eftersom luften redan är mättad (Glaumann & Westerberg, 1988).

Vi kylls också genom konvektion. Vinden kyler vår hud genom att vi avger värme till luften. Ju mer det blåser och ju större skillnaden mellan hudtemperatur och lufttemperatur är, desto större kyleffekt får vi (Brown & Gillespie, 1995). Internationellt kallas detta för "wind chill factor" och illustreras i Tabell 2.

Tabell 2. Kyleffekten av vinden på bar hud vid olika temperaturer och vindhastigheter. Exempel: Då det är 0 grader och blåser med 6 m/s känns det som minus 5 grader. (SMHI 2009c)

	10	6	0	-6	-10	-16	-26	-30	-36
2 m/s	9	5	-2	-9	-14	-21	-33	-37	-44
6 m/s	7	2	-5	-13	-18	-26	-38	-44	-51
10 m/s	6	1	-7	-15	-20	-28	-41	-47	-55
14 m/s	6	0	-8	-16	-22	-30	-44	-49	-57
18 m/s	5	-1	-9	-17	-23	-31	-45	-51	-59

Solstrålning upplever vi som värme. I solen kan det kännas 10-15 grader varmare än i skuggan (Glaumann & Westerberg, 1988). Lufttemperatur mäts alltid på platser där så lite strålning som möjligt påverkar. Alla föremål emitterar långvågig strålning, som påverkar oss människor och för att få ett värde på den sammanlagda strålningen så mäter man strålningstemperaturen (eng. *mean radiant temperature*, MRT). Det definieras som medeltemperaturen hos omgivande ytor som golv, väggar, tak etc. och innefattar direkt solstrålning, diffus solstrålning, reflekterad strålning och långvågig strålning⁴. Det är en av de absolut viktigaste parametrarna som påverkar den termiska komforten för människor under soliga sommardagar (Thorsson et al, 2007). Under blåsiga dagar är

³ Erik Johansson, föreläsning LTH 2009-02-06.

⁴ Erik Johansson, föreläsning LTH 2009-02-06.

dock vindhastigheten och lufttemperaturen de viktigaste parametrarna eftersom dessa påverkar konvektionen, dvs. värmeflödet från kroppen till luften (Höppe, 1999).

För att kunna beräkna den upplevda temperaturen finns en rad metoder. En av dem är att beräkna PET (eng. *Physiological Equivalent Temperature*). Där ingår förutom effekten av lufttemperatur och strålningstemperatur också effekten av vind och luftfuktighet. Men det är inte bara de meteorologiska parametrarna som påverkar utan också individspecifika parametrar. Dessa innefattar bland annat hur varm kroppen och huden är samt hur våt huden är (Höppe, 1999). Det är därför viktigt att beakta kroppsstorlek (både längd och vikt), ålder, kön, mängden klädsel och vilken grad av aktivitet individen utför (tex. springande, gående, stående osv). Poängen med PET är att uppskatta upplevelsen av uteklimatet som om det vore ett inomhusklimat (Mayer & Höppe, 1987).

Det behagligaste och jämnaste temperaturklimatet för människans värmebalans åstadkoms i skugga och lä. Platser som är soliga och samtidigt blåsiga är inte lika behagliga. Blir det för varmt är det således skugga som behövs i första hand, medan man alltid bör vindskydda sittplatser så långt det är möjligt (Glaumann & Westerberg, 1988). Brown & Gillespie (1995) påtalar också vikten av att kontrollera solinstrålningen under varma perioder och menar att vindkontroll då är av sekundärt intresse. När det är kallt ska man istället fokusera på att kontrollera vinden medan solstrålningen är sekundär. Då vi i vårt nordliga klimat under säsongernas skiftningar med säkerhet får uppleva mycket kalla dagar och troligen med ökad frekvens även mycket varma dagar så bör vi alltså beakta båda aspekterna.

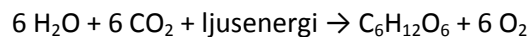
Det är dock viktigt att vara medveten om att psykologiska faktorer som förväntning, erfarenhet, exponeringstid, upplevd kontroll över situationen och hur naturlig miljön är stort påverkar hur vi uppfattar klimatet och hur mycket vi tolererar (Nikolopoulou & Steemers, 2003; Knez et al, 2009). Ur en rent fysiologisk synvinkel har människokroppen inte sensorer att uppfatta enskilda klimatiska parametrar. För att reglera temperaturen hos hud och blod kan kroppen bara uppskatta den sammantagna effekten av alla klimatiska parametrar som interagerar och påverkar varandra (Höppe, 1999).

2.4 Vegetationens påverkan på mikroklimatet

Växter påverkar mikroklimatet på olika sätt. Det mest uppenbara är att de skuggar marken. Detta innebär att de förhindrar att direkt solstrålning når marken så att den inte värms upp lika snabbt som en solbelyst yta. Detta är i urban miljö speciellt viktigt för material med låg albedo och med hög förmåga att lagra värme. För en människa känns det också svalare att befinna sig i skugga eftersom den kortvågiga strålningen från solen inte når huden. Vegetation emitterar, reflekterar och transmitterar strålning, som alla föremål. Olika typer av vegetation släpper dock igenom olika mängd kortvågig strålning, se vidare sektion 2.5 Transmissivitet hos vegetation.

2.4.1 Fotosyntes och respiration

En del av den kortvågiga solstrålning som når bladet används till fotosyntesen. Växten tar upp koldioxid och vatten och med hjälp av solenergin omvandlas detta till glukos och syre.



Genom respirationen, den omvända reaktionen, kopplas glukos till syre och blir koldioxid, vattenånga och energi. Det är endast vissa våglängder av den inkommande solstrålningen som används i fotosyntesen. Dessa våglängder kallas fotosyntetiskt aktiva våglängder (eng. *photosynthetic active radiation*, PAR). Detta innebär att viss del av energin binds i materia i växten. Denna del är dock så liten att den inte påverkar hur vi upplever klimatet (Oke, 1987).

De flesta våglängder används dock inte i fotosyntesen och reflekteras eller transmittteras genom bladen. Det sistnämnda gör att skuggan under ett träd inte känns lika kall som skuggan av en byggnad där all inkommande solstrålning avskärmas.

2.5 Transmissivitet hos vegetation

När solens strålar når ett träd eller ett skogsparti släcks en del av strålningen ut av blad, grenar och stam. Detta beror på beståndets arkitektur, dvs. växtsättet som i sin tur beror på artsammansättningen. Andra strålar strömmar genom kronan och detta utgör en del av trädets transmissivitet. Den strålning som når löven reflekteras, tas upp till fotosyntesen eller går ut på andra sidan bladet. Detta beror på lövens optiska egenskaper.

Höjden, tätheten och art påverkar hur mycket kortvågig strålning som passerar genom kronan och når marken. Generellt är det mindre än 20 % som når marken. Ibland är det så lite som 5 % (Oke 1987). Myneni et al (1989) anger tre karaktärer hos vegetationens lövverk, förutom de tidigare nämnda, som måste uppmätas för att man ska kunna beskriva ljusets väg genom den. De är den vertikala distributionen av lövens massa, hur löven är orienterade och hur de är fördelade i kronan.

Växtlighet komplicerar energiomsättningen på en plats. Om växttäcket är glest så spelar markförhållandena stor roll, om växttäcket är slutet ändras energiomsättningen helt. Enligt Mattsson (1979) är det viktigt att relatera till beståndets höjd och täthet. Täthet kan mätas i bladytindex (arean av alla blad per enhet markyta).

Vid urglesning och avverkning av vegetation tar man bort den vattenuppfångande effekten av krontaket, evapotranspirationen minskar, snöfördelningen och hur länge snötäcket ligger kvar och avrinningen ökar. Energibudgeten förändras också i och med att man blottar nya typer av ytor med annan geometri och albedo (Oke 1987).

När strålning når en bladyta kan den antingen absorberas eller spridas av lövet. Pigmenten och cellstrukturen i löven bestämmer om den absorberas då olika pigment och vatten absorberar olika våglängder. När strålningen absorberas omvandlas den till värme eller så lagras den i form av organisk massa genom att fotosyntes sker (Myneni et al, 1989).

Lövets spridning av ljus bestäms av strålningens intensitet, strålningens infallsvinkel, lövets orientering, lövets area och energi absorberad av lövet (som bestäms av dess absorptions- respektive spridningskoefficient). För väldigt tjocka blad, som inte kan släppa genom något ljus är spridningen reducerad till reflektion. Spridningen är summan av reflektion och transmission (Ross, 1981).

2.5.1 Cellstruktur

I en undersökning gjord av Gay et al (1971) utgjorde den diffusa kortvågiga strålningen 46 % av den kortvågiga strålning som nådde marken medan den ovan krontaket endast utgjorde 15% av kortvågsstrålningen. Man kan dra slutsatsen att trädkronan "diffuserar", dvs. sprider den kortvågiga strålningen. I det här fallet gjordes mätningarna vid ett bestånd av *Pinus taeda*, loblollytall i oktober i North Carolina, USA. Man mätte den globala strålningen över och under krontaket, där man hade fem pyranometrar⁵ placerade i ett mönster under trädkronorna, på 1,5 m höjd och som samtidigt mätte strålningen under krontaket. Varje ny mättag placerades dessa pyranometrar i samma mönster, men på olika platser i beståndet.

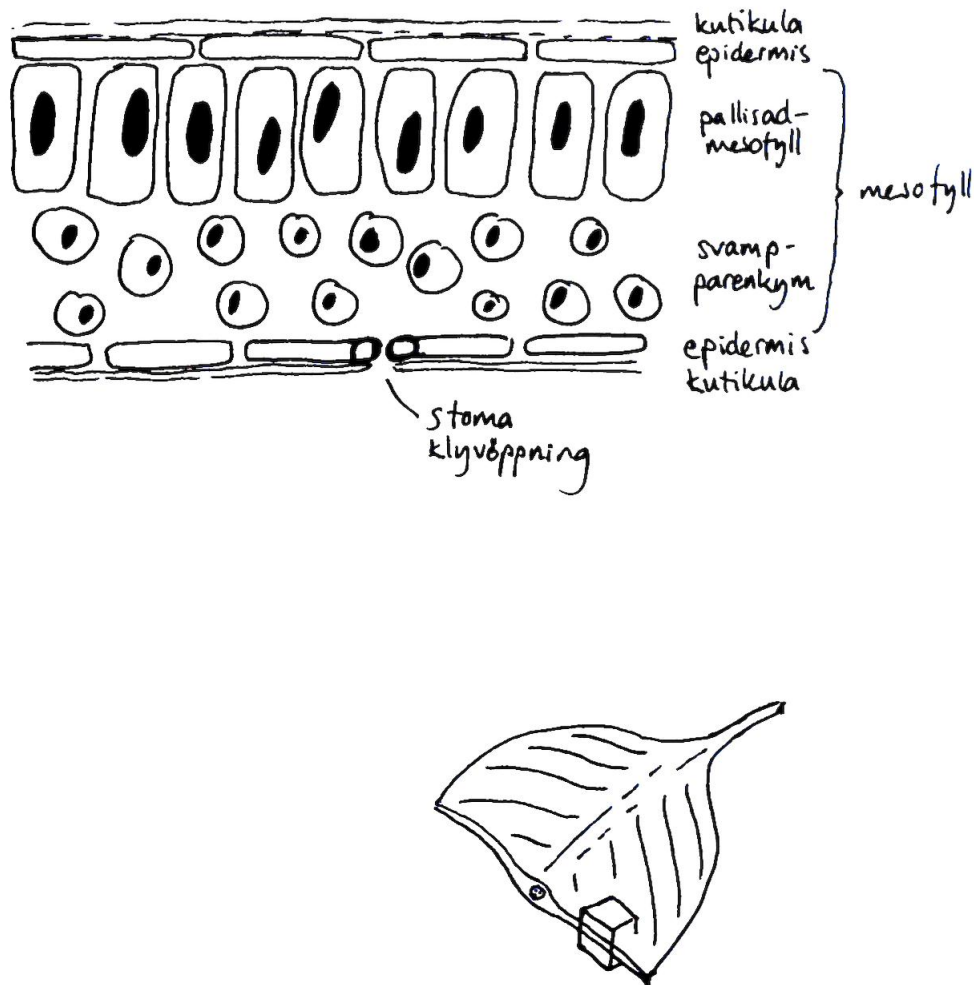
Växters cellstruktur gör att strålningen som kommer i kontakt med löv eller barr sprids oregelbundet och bildar en diffus strålning. Detta gör att nästan lika mycket strålning passerar genom lövet som reflekteras (Oke, 1987).

Lövens optiska egenskaper beror på en rad faktorer, såsom bladytans ojämnheter och brytningsindex hos vaxet i ytlagret (den så kallade kutikulan) som reglerar mängden ljus som reflekteras, sammansättningen, mängd och fördelning av pigment, vilket reglerar absorptionen av UV-ljus och synligt ljus, samt lövets cellstruktur, fördelning av vävnad och celler vilka orsakar den inre spridningen av ljuset.

Lövens absorptans, reflektans och transmittans bestäms till stor del av medellängden på ljusets väg genom bladet (Ross, 1981). Vattenhalten och fördelningen av vatten i bladet bestämmer absorptionen av IR-ljus.

Reflektion hos icke-metalliska föremål beror på skillnader i brytningsindex. Ett jämnt föremål reflekterar som en spegel med utfallsvinkeln i samma storlek som infallsvinkeln. Hur mycket av ljuset som reflekteras beror på skillnaden i brytningsindex mellan föremålet och omgivningen. Ojämna föremål bryter och reflekterar ljuset vid varje förändring i brytningsindex. Detta leder till att ljuset ofta bryts flera gånger i ett heterogent föremål som ett löv och sprids i många riktningar som diffust ljus. Vävnaden hos löv har oregelbundna ytor och mellan dess celler finns luft med brytningsindex 1. Cellerna i bladet med våt cellulosa har ett brytningsindex på mellan 1,33 och 1,5. Dessa är bra på att sprida ljuset. Detta spridda ljus fortsätter i alla möjliga riktningar efter att ha brutits i bladet många gånger. Strålningen som till slut lämnar bladet på ovansidan säger man är reflekterad och den som lämnar bladet på undersidan kallas transmitterad strålning (genomsläppt strålning). (Myneni et al, 1989) Figur 2 visar ett löv i genomskärning.

⁵ Instrument för att mäta solstrålningens intensitet.



Figur 2. Ett löv i genomskärning med dess olika lager. Kutikula är ett vaxlager, epidermis är hudlagret, mesofyll är grundvävnad och runt klyvöppningen sitter slutceller. Illustration författaren, efter Raven et al (1999).

Palliad-lagren fungerar som ljusrör ner i lövet till mesofylllagret, vilket kan sprida ljuset olika mycket beroende på art (Knapp & Carter, 1998). De lägre lövskikten i ett bestånd har högre reflektans än löven i toppen. Detta indikerar att det svampiga parenkymet bidrar mer till spridning av ljus än palliad-lagret (Ross, 1981).

Ett ökat antal cellväggar och luftfyllda mellanrum gör att tjockleken hos ett blad avgör bladets optiska egenskaper. Partiella reflektioner som orsakas av olika brytningsindex hos bladets inre delar ökar sannolikheten att strålningen ska lämna bladet genom samma yta som den kom in och minskar sannolikheten att den ska transmittas genom bladet. (Knapp & Carter, 1998)

2.5.2 Olika strategier

Olika växter har olika sätt att klara den varmaste tiden på dagen. En del vänder bladen så att solen inte träffar ytan, andra rullar ihop sina blad för att minska ytan som nås av strålning (Oke 1987).

Plantor som förändrar bladutseende och bladriktning påverkar sin transmissivitet aktivt beroende på yttre omständigheter.

Många ökenplantor har tjocka blad, vilket omöjliggör transmission. De har istället hög reflektivitet för att inte överhettas (Oke 1987). Det som påverkar transmissiviteten mest är tjockleken hos bladet. Detta kan förklaras genom att det i tjockare blad finns ett ökat antal kontaktytor mellan våta cellväggar och luftrummen mellan dessa. Skillnaden i brytningsindex mellan de olika materialen i bladet gör att strålningen ändrar riktning och detta minskar sannolikheten att en ljusstråle skulle passera rakt genom bladet (Knapp & Carter, 1998).

Barrträd har också låg transmissivitet, men deras strategi är att ha så små barr som möjligt för att få en så stor yta som möjligt jämfört med barrens massa för att kunna avge så mycket värme som möjligt till omgivningen (Oke 1987). Detta sker genom konvektion och långvågig strålning. Barrträd är genom sina barr därför väl anpassade för värmefluktuationer men lagrar inte värme så bra.

2.5.3 Lövens tjocklek

Löv i skugga är ofta tunnare än löv i sol. Knapp & Carter (1998) kunde visa att de generellt också har lägre massa per bladarea men ändå har ungefär samma optiska egenskaper som löv i soliga förhållanden. Det vill säga, de har samma egenskaper vad gäller transmissivitet, emissivitet och reflektivitet. Detta kan ske eftersom blad som är anpassade för skugga på grund av sin lägre massa kräver mindre energi för att uppnå samma optiska egenskaper som löv anpassade för sol. För att de ska kunna få samma optiska egenskaper som ett blad i sol blir slutsatsen att de sprider ljuset mer per enhet bladmassa (ibid.). Bland andra Knapp & Carter (1998) har också i försök visat att spridningseffektiviteten (transmittans och reflektans per enhet torr bladmassa) är markant högre hos löv från mellan- och underskikt i trädkronan än hos löv från de övre skikten. Det finns dock inget som talar för att blad från skuggiga miljöer skulle ha förmågan att reflektera strålning mer inuti bladen, utan detta beror på bladets tjocklek. (Knapp & Carter, 1998)

2.5.4 Koefficienter

Koefficienter används vid beräkningar av föremåls optiska egenskaper och är ett fast värde för olika medium. Också för växtlighet har man tagit fram några koefficienter.

Reflektionskoefficienten hos blad varierar vanligen mellan 0,05 och 0,3 för olika växtarter och beror dessutom på våglängden. Den minskar i UV-området och ökar i IR-området. För vegetationen som helhet är albedon dock lägre och beror till viss del på vegetationens höjd (Oke, 1987). Förmodligen beror detta på mängden strålning som "stängs in" (ibid.). Strålningen som kommer in i kronan reflekteras mellan bladen flera gånger innan den går ut ur kronan. Albedo är lägst för barrträd (speciellt gran), högre för kala lövträd och högst för fullt lövade lövträd. På morgon och kväll är albedo högre, men eftersom strålningsenergin är lägre då så har det inte så stor betydelse för den totala strålningsbudgeten (ibid.)

Transmissionskoefficienten anger hur mycket av den kortvågiga instrålningen som tränger genom växtmaterialet. För lövträdsblad är det 0,05-0,10 enligt Rosenberg (1974, se Mattsson, 1979).

Emissionskoefficienten är ofta omkring 0,9 för bladytor (Mattsson, 1979). Över och undersidan av bladen anses ha identiska emissionsegenskaper.

Spridningskoefficienten är summan av reflektionskoefficienten och transmissionskoefficienten. Eftersom infrarött ljus till stor del transmitteras av växterna så utnyttjas det i olika experiment. Knapp & Carter (1998) gjorde några försök som gav resultatet att spridningskoefficienten kan uppskattas genom att dividera reflektansen av NIR med transmittansen av NIR.

2.5.5 Infallsvinkeln mot bladytan

Strålningens infallsvinkel mot bladytan har stor betydelse för hur strålningen hanteras av bladet. För en infallsvinkel på 65 grader mot bladets normal så har man funnit att mindre än 5 % av den infraröda strålningen reflekteras av bladen (Gates & Tantraporn, 1952, se Myneni, 1989). Blir infallsvinkeln mindre så minskar reflektionen ytterligare. Dock är reflektionen mindre på undersidan än på ovansidan bladen. Vid dessa våglängder kan man också se att reflektionen ökar med bladens ålder och beskuggning (ibid.). Reflektionen av synligt ljus minskar däremot med ålder och beskuggning. Vid stora infallsvinklar har också tjockleken på bladen stor betydelse (Ross, 1981). Lövets normal och infallsvinkel förklaras i Figur 3.

Ytstrukturen på bladen har en stor betydelse för reflektionen. För matta löv är spridningen oberoende av infallsvinkeln hos strålningen. Glansiga blad, som har ett tjockt vaxlager på ytan orsakar en kraftig reflektion vid både små och stora infallsvinklar. Även om reflektansen kan variera stort mellan olika löv så har ett och samma löv en stabil spridningsfunktion under större delen av sitt liv (Ross, 1981) .

Absorptionskoefficienten ändras med solhöjden. Dvs. mängden absorberat ljus beror på strålningens infallsvinkel mot bladet. Absorptionen hos suckulenter och barrväxter är dock i princip oberoende av solhöjden. Det är en barrväxt som innehar rekordet i högst absorptionskoefficient (Ross, 1981). Transmissionen minskar med en ökad infallsvinkel och reflektionen ökar. Men transmissionen är lika på båda sidor. För absorption råder motsatt förhållande som för transmission. Ett generellt tal för transmission hos löv av vedartade växter är 0,18-0,24 (ibid.). Se Figur 3 för en illustration över hur infallsvinkeln påverkar reflektion och transmission.



Figur 3. Solens infallsvinkel mot lövets normal påverkar reflektion och transmission. Den blå linjen symboliserar lövets normal, som alltid är vinkelrät mot bladets yta. I den högra bilden står solen högre fast bladet står i samma vinkel och infallsvinkeln mot normalen blir då mindre. Därmed blir reflektionen mindre och transmissionen större. Illustration författaren.

2.5.6 Årlig variation

Lövfällande träd har en årlig cykel där de, här i Norden, faller sina löv på hösten för att utveckla nya på våren. Under den lövfria perioden är transmissiviteten högre.

Den största delen infallande global kortvågig strålning absorberas av lövad eller avlövad krona. Liakatas et al (2002) undersökte hur den globala kortvågiga strålningen (dvs. den direkta plus den diffusa kortvågiga strålningen) absorberades i ett lövat och i ett avlövat kronblad av *Quercus frainetto*, ungersk ek, utanför Aten. Man mätte kontinuerligt under ett års tid både strålning av våglängderna 300-3000 nm samt strålning av 400-700 nm, dvs. PAR. När träden är lövade är transmissiviteten enligt Liakatas et al (2002) 15 % av globalstrålningen. Då var samtidigt reflektiviteten nära 0 %. Eftersom reflektiviteten är liten påverkar den inte energibalansen i kronan och uppvärmningen av omgivande luft. Under vegetationsperioden är absorptiviteten nära 0,7 och summan av reflektivitet och transmissivitet är då 0,3. Den mycket låga transmissiviteten hos lövade träd reducerar temperaturvariationerna under kronan. Strax innan lövsprickning är transmissiviteten av globalstrålning 40 %. Detta beror på den låga tätheten i kronan och låg absorptivitet hos grenar och stam. Även under i avlövat tillstånd absorberar träden en större del av PAR än av andra våglängder (Liakatas et al, 2002). De Abreu & Labaki (2008) mätte direkt solstrålning över och under några välanvända stadsträdsarter i Brasilien och resultaten visade att för den lövfällande arten *Tabebuia Chrysotricha*, på engelska Golden trumpet tree, var transmissiviteten hos lövade träd 18,3 % och transmissiviteten hos avlövade träd 53,9 %.

På grund av den lägre solhöjden under vintern så har trädets stam och grenar stor skuggverkan och därmed större betydelse för transmissiviteten. Den mörka barken absorberar också en större del av den direkta strålningen än löv. Under den lövfria delen av året är avskärmningen av den totala

inkommande strålningen större än den av den direkta strålningen. Det motsatta gäller för lövade kronor eftersom de stänger in strålningen i kronan genom reflektion och därmed utarmar strålningen på fotosyntetiskt aktiv strålning, PAR (Baldocchi et al, 1984).

Städsegröna växter har också en årlig variation. Absorptionen av NIR är minst på sommaren och högst på hösten för att sedan sjunka långsamt fram till nästa sommar. När det gäller absorption av NIR är skillnaden mellan städsegröna arter stor. Barr har generellt högre absorptionskoefficient än blad (Ross, 1981).

2.5.7 Lövens orientering

Bladens riktning har stor betydelse för transmissiviteten hos träd genom att den påverkar hur mycket av strålningen som når bladen och hur mycket som går genom trädkronan, mellan bladen. Detta samverkar med solhöjden då även solhöjden bestämmer hur mycket ljus som träffar bladen. Det kan jämföras med persiennerna som är vinklade i olika riktningar. När solen står högt kan persiennerna stå helt horisontellt och ändå skugga golvet innanför. Vid lägre solhöjd kommer solstrålarna få fri passage in om persiennerna lämnas orörda. Det påverkar också hur strålningen hanteras av de individuella bladen, vilket förklaras i stycket 2.5.5 Infallsvinkel.

I en undersökning gjord av Kalma (1970, se Oke 1987) reflekterades 15 %, transmitterades 21 % och absorberades 64 % av den kortvågiga strålningen. Dessa värden uppmättes i en apelsinodling. Mätningar på endast ett lager blad visade motsvarande värden på 32 %, 19 % och 49 %. Detta visar att bladens orientering och kronans djup påverkar absorptionen på grund av "instängning" av strålning. Denna instängning beror på att strålningen reflekteras inom kronan flera gånger (Oke 1987).

Enligt de Wit (1965 se Ross, 1981) finns det fyra huvudsakliga lövorienteringar; planophile, erectophile, plagiophile och extremophile orientering, se Tabell 3. Biswas (2007) blandar dessa i en teoretisk undersökning och lägger till plano-plagiophile och erecto-plagiophile orientering, vilka enligt Biswas ger mer verklighetstroga modeller. Otto & Trautmann (2008) redovisar sju olika idealistiska lövorienteringar. Förutom de fyra förstnämnda ovan även; horizontal, uniform och vertical. Ross (1981) visar också uniform orientering, vilket innebär att alla löv är lika mycket riktade åt alla håll. Alla dessa används när man matematiskt beräknar ljusgenomstrålningen genom ett växtbestånd genom att man skapar så kallade "leaf normal distribution functions" - LNDF. Orienteringarna betecknar riktningen hos normalen, som visas i Figur 3. Tabell 2 ger en förklaring av de olika orienteringarna. Bladen i Figur 3 har en planophile orientering.

Tabell 3. Sju olika förekommande lövorienteringar i modelleringar av bland annat strålningsdistributionen i jordbruksgrödor. (Ross, 1981; Otto & Trautmann, 2008).

Namn	Lövens orientering	Normalens orientering
Planophile	Mestadels horisontellt orienterade löv	Mestadels vertikala lövnormaler
Erectophile	Mestadels vertikalt orienterade löv	Mestadels horisontella lövnormaler
Plagiophile	Omkring 45 graders lutande blad	normaler lutande 45 grader från y-axeln
Extremophile	Löv orienterade både horisontellt och vertikalt	Normaler i horisontell och vertikal riktning
Horizontal	Endast vertikalt orienterade löv	Endast horisontella lövnormaler
Vertical	Endast horisontellt orienterade löv	Endast vertikala lövnormaler
Uniform	Löv orienterade lika mycket åt alla håll	Normaler lika mycket i alla riktningar

Utifrån dessa funktioner kan man beräkna den så kallade G-funktionen (geometric function), vilken är ett mått på sannolikheten för att strålningen ska nå bladen och därmed utsläckningen av strålningen i ett tätt bestånd (Otto & Trautmann, 2008). G-funktionen beror på lövens area och riktning samt solhöjden (Ross 1981) och visar därmed egentligen hur stor del av bladens yta som projiceras mot solen.

2.5.8 Tid och rum

Transmissionen av strålning genom en trädkrona varierar både med tid och med rum på följande sätt. Vad gäller tid så påverkas strålningen av de små och snabba fluktuationerna i löven som sker genom vindens påverkan. Den styrs också av variationer beroende på små moln som tidvis skymmer solen och solens rörelse över himlen. Den dagliga variationen och årstidsvariationer påverkar naturligtvis också. De rumsliga variationerna beror på fysiska egenskaper hos plantan, vilka är artspecifika och individspecifika. De kan vara plantans ålder, plantornas avstånd, variation i storlek och form hos plantans inre organ, samt växtsätt och organisering av plantans organ i kronan (löv, skott och grenar) (Ross, 1981).

Om trädbestånd är glesa uppstår stora temperaturvariationer i markytan på grund av att solstrålar tränger genom krontaket. Temperaturskillnaden mellan dag och natt i ett sydsvenskt bokbestånd, som är mycket tätt, kan sommartid vara 4-5 grader, medan den är betydligt större i öppen terräng (Mattsson, 1979). Skogsbryn, gläntor och mindre bestånd får en klimatkaraktär som är en blandning av öppen terräng och skog (ibid.).

Ljuset som når marken är urlakat på våglängder användbara till fotosyntesen och det är därför svårare för vegetation att överleva under ett trädbestånd. Hur mycket ljus som penetrerar krontaket

beror på trädens ålder. När träden är unga minskar strålningsgenomsläppet stadigt i och med att träden växer och tar upp allt större plats, men då konkurrens gör att vissa individer naturligt gallras ur får det följden att strålningen i beståndet kan öka återigen (Oke 1987). På så vis pendlar transmissionen över tid i ett skogsbestånd.

2.6 Matematiska modeller av vegetation

Växter är svåra att modellera matematiskt eftersom varje unikt blad har dubbla aktiva ytor. Detta ökar förstås arean för strålning och värmeutbyte. Varje blad kan dock inte beräknas för sig för att sedan multiplicera med summan av trädets hela bladyta eftersom bladen i hög grad påverkar varandra på olika sätt samt påverkas olika beroende på vilken del av kronan de befinner sig (Oke, 1987). Strålningen i ett växtbestånd beror på genomstrålningen genom detta, vilket påverkas av växternas geometriska och optiska egenskaper. Strålningen absorberas och sprids av växternas organ (löv, stam, grenar, blommor etc.). Den inkommande strålningen förändras när den penetrerar beståndet. Skillnaden mellan atmosfären och ett växtbestånd är storleken på de element som absorberar och sprider ljuset. Växtsätt och arkitekturen hos plantbestånd varierar mycket i form. Formerna är komplexa och utseendet är varken slumpmässigt eller helt regelbundet. Allt detta gör det svårt att modellera matematiskt. Tätheten hos växterna är dock mycket större än hos atmosfären vilket å andra sidan underlättar något då man kan anta att det optiska djupet är oändligt. Atmosfären absorberar inte mycket strålning, men sprider en stor del av ljuset. Vegetation absorberar däremot en stor del, i synnerhet i våglängdsområdet PAR. Därför är arkitekturen hos vegetationen den viktigaste påverkande egenskapen. För enstaka träd modellerar man ofta geometriska figurer som man anger reflektivitet och transmissivitet för (Ross, 1981).

3 Metod

3.1 Design

Transmissiviteten av direkt solljus hos fyra olika träd av olika art mättes under våren 2011. Fyra träd av olika art valdes för att visa på skillnader hos olika arter. Global och diffus strålning mättes i skuggan av träden och samtidigt ovan trädkronorna för att sedan kunna räkna ut den direkta strålningen. Mätningarna skedde under helt klara dagar för att minimera den diffusa strålningen.

3.2 Instrument

Lufttemperatur och relativ luftfuktighet mättes med hjälp av en Rotronic YA-100. Vindhastighet och riktning mättes med en ultraljudsanemometer av typ R M Young, 8100. Inkommande global strålning mättes med en pyranometer av typ Kipp & Zonen CM3. Den globala och den diffusa strålningen mättes samtidigt med en pyranometer av typen SPN1 (Delta-T). Den har ett mätintervall på 0-2000 W/m², en mätnoggrannhet på ± 10 W/m² och ett tröskelvärde på 120 W/m². Pyranometrarna sattes vågrätt på 1,1 m höjd. Det är den genomsnittliga höjden för tyngdpunkten hos vuxna människor (Mayer & Höppe, 1987). För att få instrumenten vågrätta användes det integrerade vattenpasset i instrumenten. Loggrarna sparade de uppmätta värdena som medelvärden per minut. Instrumenten kan ses i Figur 5 och Figur 4.



Figur 5. Uppställningen av mätinstrumenten. Foto författaren.



Figur 4. Pyranometrarna som användes på mätplatserna. Till vänster ses SPN1 och längst till höger Kipp & Zonen CM3. Instrumentet i mitten användes ej i undersökningen. Foto författaren.

Den meteorologiska datan från ovan trädkronorna kommer från en väderstation på taket av Geovetarcentrum, intill Guldhedstorget, se Figur 8. Där mättes lufttemperatur och fuktighet med en Rotronic YA-100. Global och diffus solstrålning mättes med en SPN1 pyranometer. Värdena sparas där i en logger kontinuerligt som 10-minuters medelvärden.

3.3 Träden

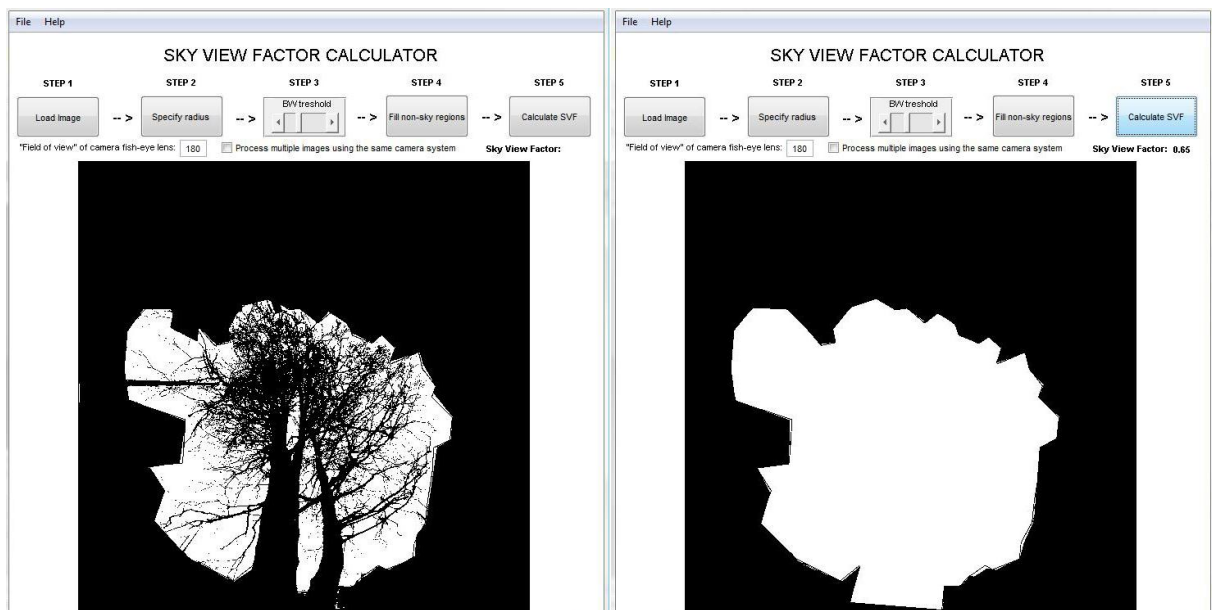
Mätplatserna valdes med hänsyn till att det redan fanns vissa mätvärden att tillgå under sommartid på en av dessa platser. Ursprungligen valdes dessa för att vegetationen skulle ha stor påverkan på strålningstemperaturen (Lindberg & Grimmond, 2010).

Träden som valdes var en hästkastanj (*Aesculus hippocastanum*), en skogslind (*Tilia cordata*), en vårtbjörk (*Betula pendula*) och en svarttall (*Pinus nigra*). De lövfällande träden var vid mättillfällena avlödade. Trädens bredd och stamhöjd mättes med måttband. Deras totala höjd räknades ut via tangenssatsen där vinkeln mättes med en inklinometer och avståndet till trädet med måttband.

3.4 Himmelsexponeringsfaktor

Under mätningarna togs foton vid mätinstrumentet och horisontellt rakt upp med en så kallad fisheye-lins - en kameralins som fotograferar i 180 grader. Genom programmet Sky View Factor Calculator, som finns att gratis ladda ner på Stadsklimatgruppens hemsida⁶, räknades himmelsexponeringsfaktorn ut. För att kunna räkna ut himmelsexponeringsfaktorn endast genom trädet så mörklades allt i bilden utom trädet och en faktor togs fram av programmet. Sedan gjordes en likadan bild där hela ytan för trädet var vitmålad, övrigt svart och en annan faktor togs fram. Kvoten mellan dessa faktorer antogs vara himmelsexponeringsfaktorn genom trädet. De två slutbilderna i Sky View Factor Calculator som användes till kalkylering av vårtbjörkens himmelsexponeringsfaktor kan ses i Figur 6.

⁶ <http://www.gvc.gu.se/Forskning/klimat/stadsklimat/gucg/software/skyviewfactorcalculator>



Figur 6. De två bilderna av vårtbjörken som användes för att kalkylera himmelsexponeringsfaktorn genom det enskilda trädet.

3.5 SOLWEIG

Den matematiska modellen SOLWEIG (version 2.2) användes för att modellera strålningstemperaturen för de olika mätplatserna. Modelleringarna gjordes också för att validera modellen. Då SOLWEIG behandlar data timme för timme var det nödvändigt att även göra timmedelvärden av rådatan, både den uppmätta under träden och den från taket.

Digitala evelueringsmodeller (DEMs) gjordes för de två mätplatserna, en för byggnader och andra hårda strukturer och en för vegetation. Rätt plats (i SOLWEIG kallad point of interest) hittades genom att göra skuggmodelleringar och genom "trial and error" finna den plats där träden kastade skugga under samma tidpunkter som under de faktiska mätningarna.

Som den meteorologiska datan som används som input i SOLWEIG användes datan som uppmäts på taket av Geovetarcentrum.

Tolv modelleringar gjordes i SOLWEIG, tre för varje mätplats med varierande transmissivitet hos träden. En modellering gjordes med transmissivitet 1, total transparens, för referens. Sedan gjordes en modellering med uppmätt transmissivitet samt en mitt emellan denna och 1 för vart och ett av träden. För de lövfällande träden valdes 0,8 och för svarttallen valdes 0,6 som denna mellantransmissivitet.

Den långvågiga strålningen antogs vara 0 % för modelleringen av strålningstemperaturen⁷, som även Lindberg & Grimmond (2011) gjorde.

⁷ Efter konsultation med handledare Fredrik Lindberg, stadsklimatgruppen, Geovetarcentrum, Göteborgs Universitet.

3.5.1 Det här är SOLWEIG 2.2

SOLWEIG står för "solar and longwave environmental irradiance geometry model" och är en matematisk modell som kan beräkna bland annat skuggmönster, strålningsfluktuationer och strålningstemperatur i urban miljö. Den kan användas som hjälpmedel vid analys av samspelet mellan den fysiska miljön och värmeklimatet och kan skapa kartor som visar strålningstemperaturen i olika planerade miljöer.

För beräkningarna krävs att man för in ett antal variabler i modellen; global kortvågig strålning, lufttemperatur, relativ luftfuktighet, latitud, longitud och höjd över havet samt den urbana geometrin på platsen. Den sistnämnda görs som en digital modell som sparas i filformatet ESRI ASCII GRID och kallas DEM - Digital Evaluation Model. Denna fil kan göras i nästan vilket GIS-program som helst (Urban Climate Group, 2011).

Det sista steget innan man kan köra modellen är att lägga till ett antal specifika parametrar varav en del är variabla. Urbana parametrar är albedo och emissivitet hos väggar och mark. Den enda variabla parameter för vegetation som finns i dagsläget är transmissivitet av kortvågig strålning och denna har ett förinställt värde på 0,2. Det finns också några parametrar för strålningstemperatur, som innefattar absorptionen av lång- och kortvågig strålning hos en människa samt om personen är stående eller sittande. I kommande versioner av SOLWEIG ska man även kunna ange ålder, längd, klädsel med mera för att kunna beräkna PET direkt i SOLWEIG (Urban Climate Group, 2011).

Under andra halvan av 2010 utvecklades modellen till att behandla vegetation. Detta är en första version som är under utveckling. Här kan man även ladda upp en vegetationsfil i DEM-format eller lägga till vegetation direkt i programmet. Vegetationen behandlas som geometriska former där träd och buskar kan väljas. Tre former finns tillgängliga; konisk, sfärisk/oval och halvsfärisk/halvoval. Till detta kan läggas en stam i form av en cylinder om vegetationen är i form av ett träd.

Under evaluering av modellen kunde man se att modellen överskattar strålningstemperaturen under vegetation något (Lindberg & Grimmond, 2010).

SOLWEIG är fri att använda och kan laddas hem på stadsklimatgruppens hemsida. För att kunna använda modellen behövs programmen Java Runtime Environment (version 6) och MATLAB Compiler Runtime 7.13 (Urban Climate Group, 2011). Den sistnämnda finns också att ladda ner gratis på stadsklimatgruppens hemsida. Java är även den kostnadsfri och finns att tillgå på internet.

3.6 RayMan

Bilderna på solens väg över himlen är konstruerade med hjälp av programmet RayMan, ett program för att modellera strålningstemperatur och temperaturindex. Programmet kan laddas ner gratis från Universitetet i Freiburg⁸. Dessa bilder har sedan lagts samman med fisheye-bilderna med hjälp av Adobe Photoshop.

⁸ <http://www.mif.uni-freiburg.de/rayman/intro.htm>

3.7 PET

För att öka läsarens förståelse för betydelsen av transmissivitet och betydelsen av olika strålningstemperatur för det upplevda klimatet så räknades PET ut. Detta gjordes med hjälp av MatLab. Lufttemperatur, luftfuktighet och vindhastighet togs från de mätningar som gjordes. Den i SOLWEIG modellerade strålningstemperaturen användes eftersom den inte mättes i den här studien.

3.8 Analys

Solhöjden räknades ut med hjälp av MatLab och den direkta strålningen kunde sedan räknas ut för varje mätning genom formeln $G = I \sin(h) + D$ där G =global strålning, I =direkt strålning, h =solhöjd över horisonten, D =diffus strålning. (Spitters et al, 1986 & SMHI, 2009b)

Mätresultaten behandlades i Ms Excel och medelvärden per 10 minuter skapades för att kunna jämföra de uppmätta värdena med meteorologiska värden ovan trädkronorna. Kvoten mellan takdatan och de uppmätta värdena då instrumenten skuggas av de enskilda träden utgjorde transmissiviteten. Endast tidpunkter då solen skuggats av trädkronan har tagits med i beräkningarna av transmissivitet.

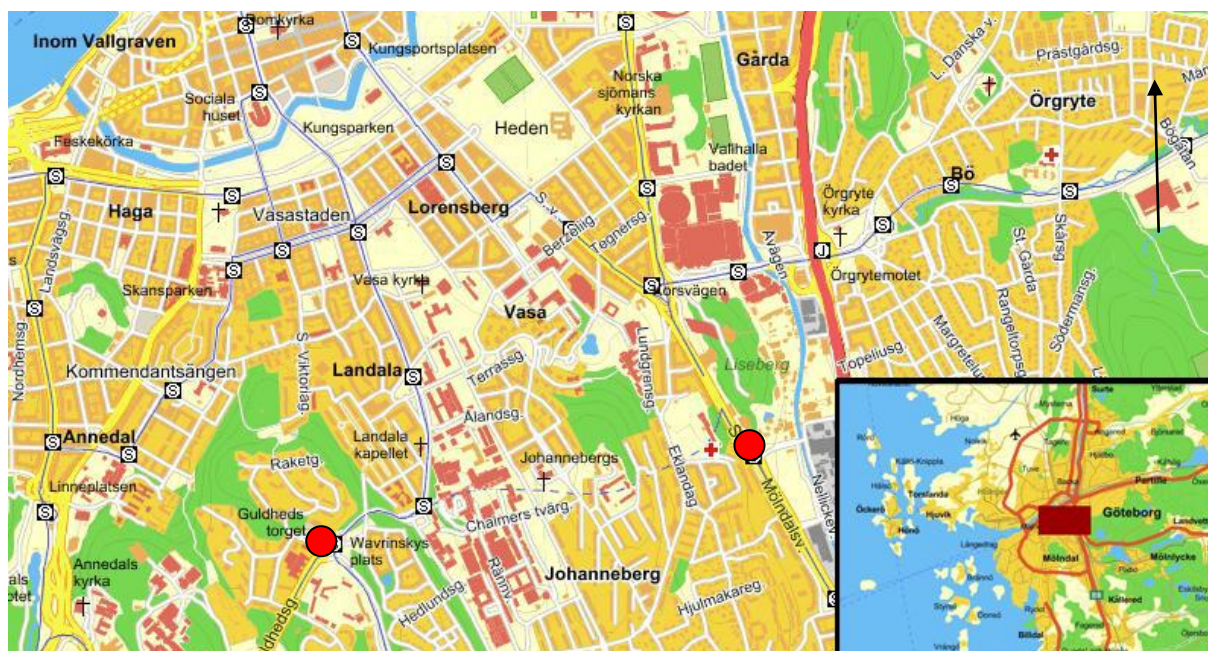
Resultaten från modelleringarna i SOLWEIG gällande direkt solstrålning under kronan för de tre olika transmissiviteter och de fyra olika mätplatserna jämfördes med de uppmätta värdena för dessa för att kunna validera modellen.

Jag har också fått tillgång till mätvärden som togs i en tidigare studie (Lindberg & Grimmond, 2011) med samma mätplats som nedan kallas mätplats 2. Dessa mätningar gjordes med sex stycken pyranometrar av typen Kipp & Zonen CM3 i sex motstående riktningar för att mäta strålningstemperaturen. I min studie använde jag värden från ett av dessa instrument, det som var riktat rakt uppåt. Då dessa värden endast innefattar global strålning kunde inte den direkta strålningen genom trädet räknas ut genom samma formel som i mina egna mätningar. Därför beräknades transmissiviteten av total strålning i detta fall för att göra mätningarna jämförbara.

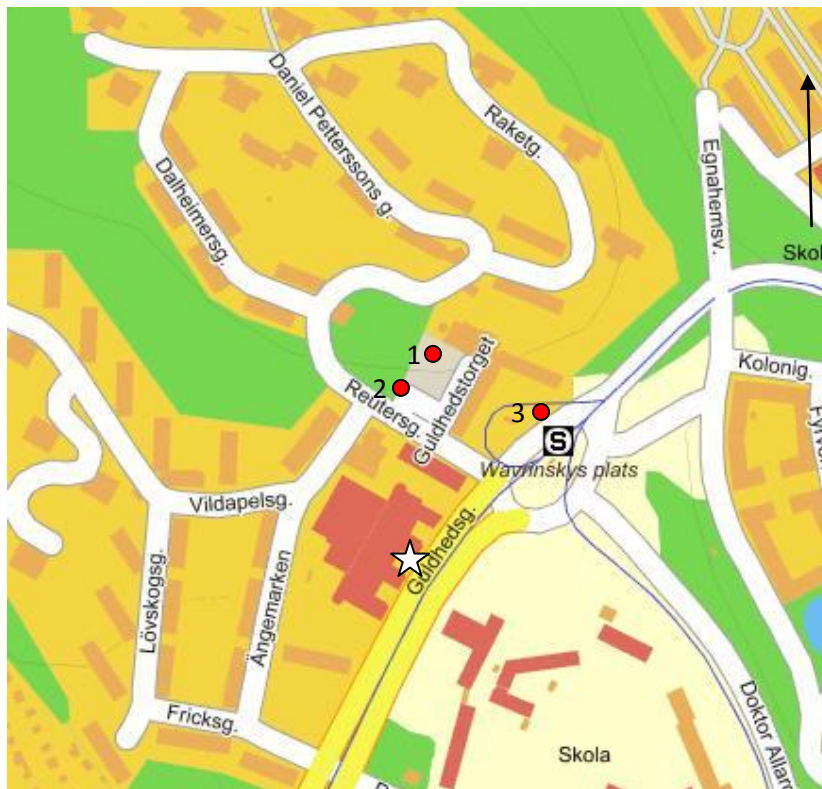
4 Studieområde

Klimatet i Göteborg är maritimt och tempererat. Här faller 774 mm regn per år (SCB, 2011) och solskenstid är omkring 1800 timmar per år (SMHI, 2009a). Den högst uppmätta temperaturen i Göteborg är 34,1 °C och den lägsta är -26,4 °C (SCB, 2011). Medeltemperaturen i Göteborg under juni-juli-augusti var för normalperioden 1960-90 15,6 °C (ibid.). Under december-januari-februari 2009 var den -1,0 °C (ibid.). Göteborg är Sveriges andra största stad och är relativt högt exploaterat, vilket naturligtvis inverkar på värmelagringen. Här bildas en urban värmeö.

Mätplatserna är markerade på kartorna i Figur 7 och Figur 8 .



Figur 7. Karta över del av Göteborg där mätningarna ägde rum. De två områdena är markerade med rött. Guldhedstorget till väster och mätplats 4 till öster. Bildkälla: Eniro



Figur 8. Karta över Guldheden med mätplatserna 1-3 markerade. Geovetarcentrum där ytterligare mätutrustning finns på taket är utmärkt med vit stjärna. Bildkälla: Eniro.

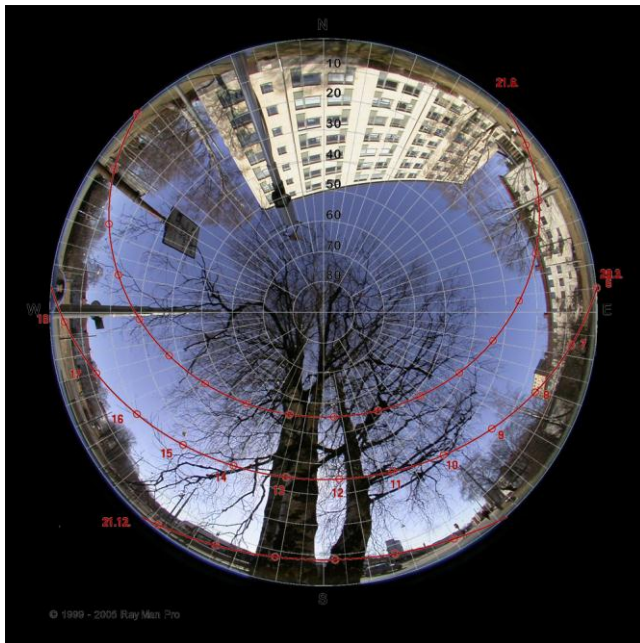


Figur 9. Träden som undersöktes omkring Guldhedstorget inringade i rött och mätplatserna markerade med punkter. Från vänster: *Tilia cordata*, *Aesculus hippocastanum* och *Betula pendula*. Bildkälla: Eniro

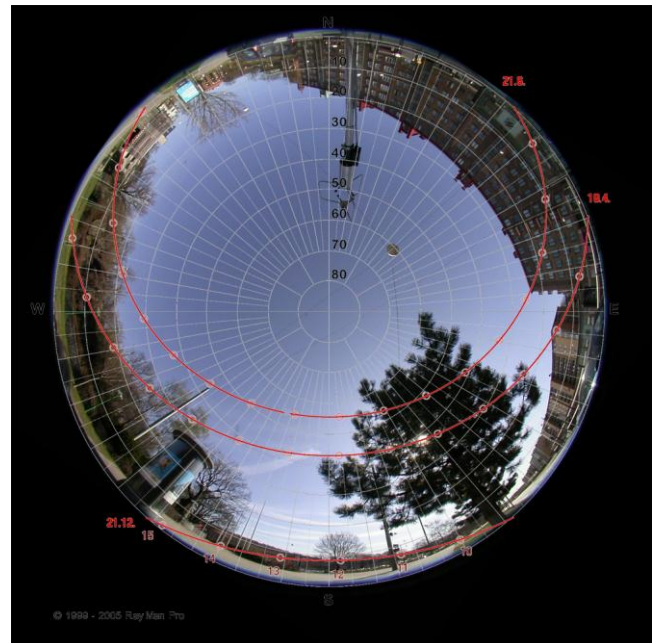
Lindarna har bara ca en vecka innan mätningen höjts något i kronan, dvs. några av de lägre grenarna har sågats av intill stammen. Detta bedöms dock inte påverka mätresultaten då man inte har glesat ur inne i kronorna.

4.1.3 Mätplats 3

Mätplats 3 ligger öster om Guldhedstorget, på en outnyttjad grönyta som vetter mot Wavrinskys plats, se Figur 9. Här finns en vändplats och reservhållplats för spårvagn. Ytan är lätt kuperad och täcks av gräs. Här finns ett högre buskage och ett antal träd i varierande ålder. Objektet är en vårtbjörk, *Betula pendula* som är trestammig och bedöms vara ca 30 år gammal och med god vitalitet. Vid mättillfället har vårtbjörken välutvecklade hängen, men har inte börjat slå ut ännu.



Figur 12. Vårtbjörken och solens rörelse över himlen sett från mätinstrumentet. De olika solkurvorna representerar högsta och lägsta solhöjd under sommarsolstånd och vintersolstånd samt solkurvan under mät dagen. Foto författaren.



Figur 13. Svarttallen och solens rörelse över himlen sett från mätinstrumentet. De olika solkurvorna representerar högsta och lägsta solhöjd under sommarsolstånd och vintersolstånd samt solkurvan under mät dagen. Foto författaren.

4.1.4 Mätplats 4

Mätplats 4 finns någon kilometer nordost om Guldheden, strax söder om Liseberg, se Figur 7 och Figur 14. Här löper Södra vägen som kantas av prydnadskörsbär, *Prunus cv.*, och svarttall, *Pinus nigra*. Objektet är en svarttall som står relativt fritt i den gräsklädda refugen mellan cykelbana och körbana. Dessa träd planterades på denna plats för fyra år sedan, men uppskattas ha en sammanlagd ålder på ca 10-15 år. Träden är täta och fina och ser ut att må bra.



Figur 14. Placering av det exemplar av *Pinus nigra* som undersöktes och mätplats 4. Bildkälla Eniro.

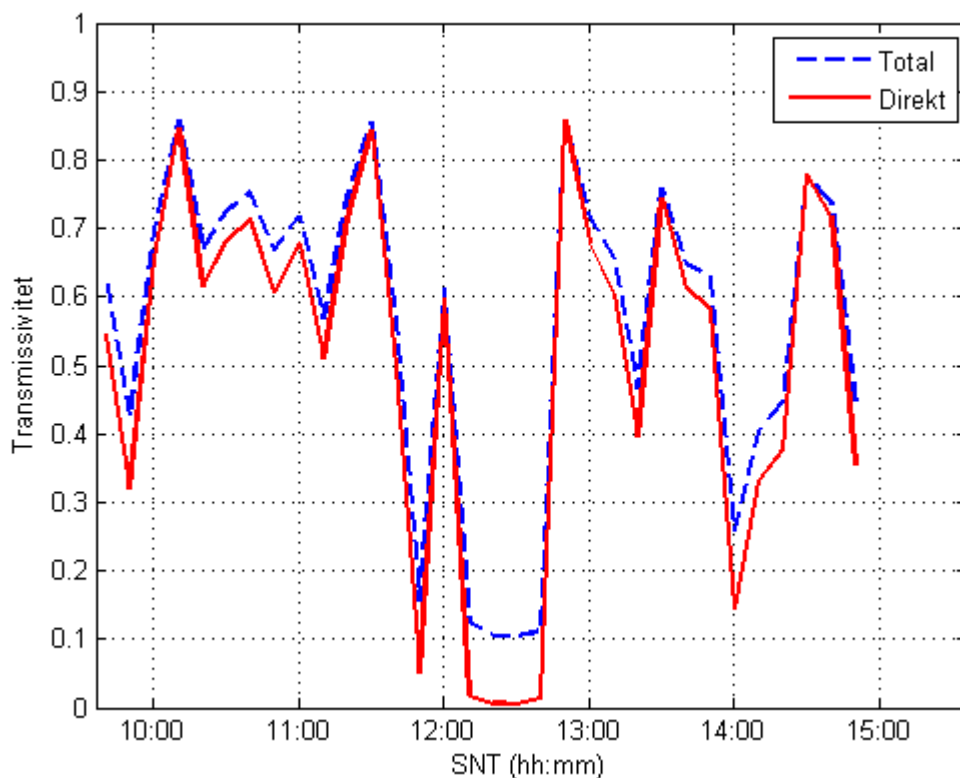
5 Resultat

I det här avsnittet redovisas mätresultaten. Det bör påpekas att alla mätningar har registrerats i svensk normaltid (SNT), dvs. vintertid.

5.1 Transmissivitet för olika arter i avlövad tillstånd

5.1.1 Hästkastanj, *Aesculus hippocastanum*, mätplats 1

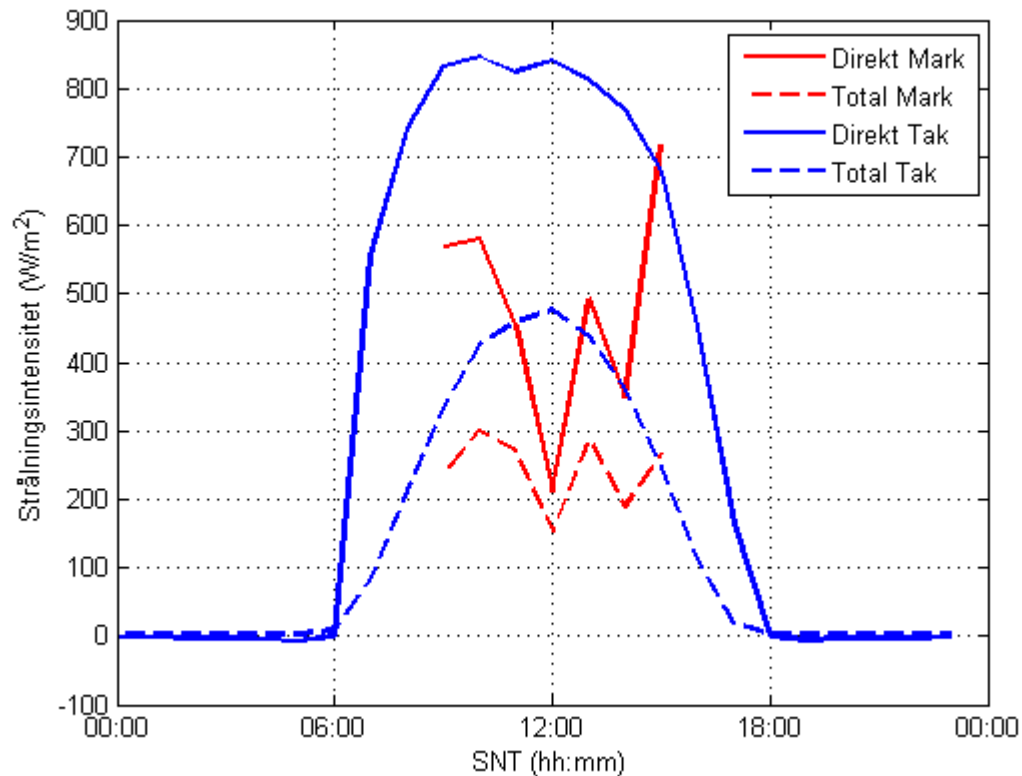
Medeltransmissiviteten för hästkastanj var 0,57 för den totala strålningen respektive 0,52 för den direkta strålningen. Över tid varierade transmissiviteten av direkt strålning mellan 0,01 och 0,85 där det lägsta värdet finns i skuggan av stammen (mellan kl 12.10 och 12.40 i Figur 15.) Höga värden återfinns vid olika tillfällen under solens väg genom kronan, men även låga värden återfinns vid flera tillfällen under dagen. Dessa återfinns där instrumenten hamnat i skuggan av någon större gren, som har påverkat 10-minutersmedelvärdena.



Figur 15. Transmissiviteten av total respektive direkt solstrålning genom kronan hos en hästkastanj, *Aesculus hippocastanum*, den 8 mars baserat på 10-min medelvärden.

Figur 16 visar den uppmätta strålningsintensiteten över och under kronan på hästkastanjen den 8 mars. Tim-medelvärden av den totala och den direkta strålningen redovisas. Kurvorna "direkt mark"

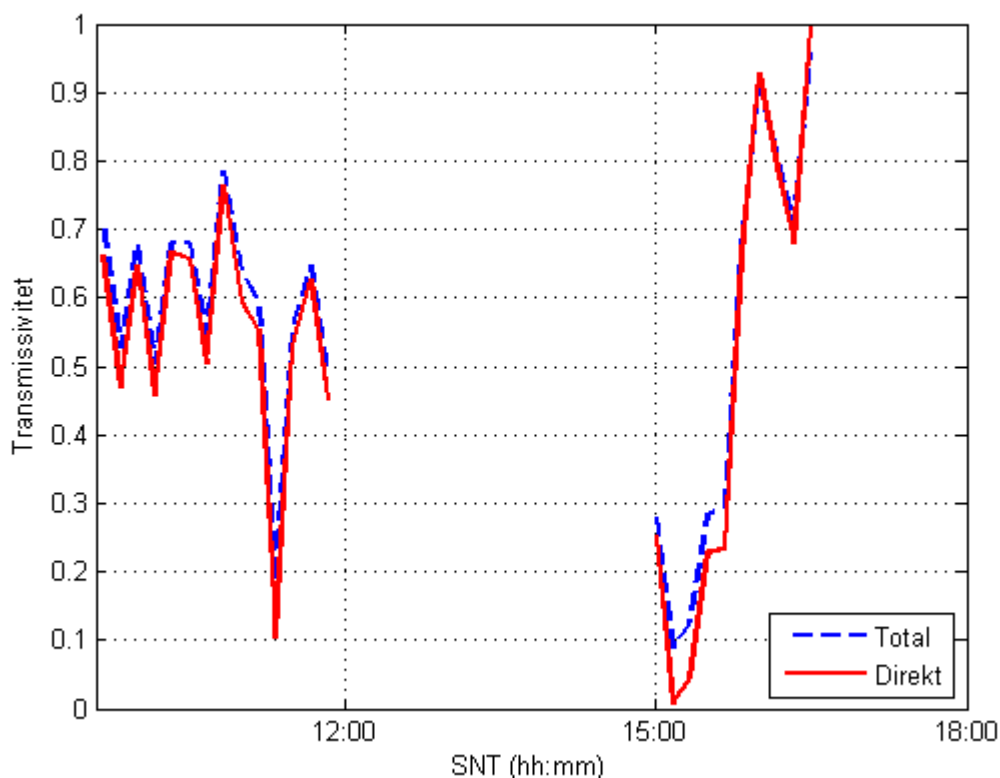
och total mark motsvarar kurvorna "direkt" och "total" i Figur 15. Dessa ser vid en jämförelse olika ut, vilket beror på att de olika figurerna är baserade på 10-min medelvärden respektive 60-min medelvärden. De blå kurvorna, vilka representerar värdena ovan trädkronan visar hur strålningen varierade under dagen. En helt klar dag är dessa kurvor helt jämna med högsta värdet mitt på dagen.



Figur 16. Den totala och direkta strålningen över och under hästkastanjen baserat på 60-min medelvärden.

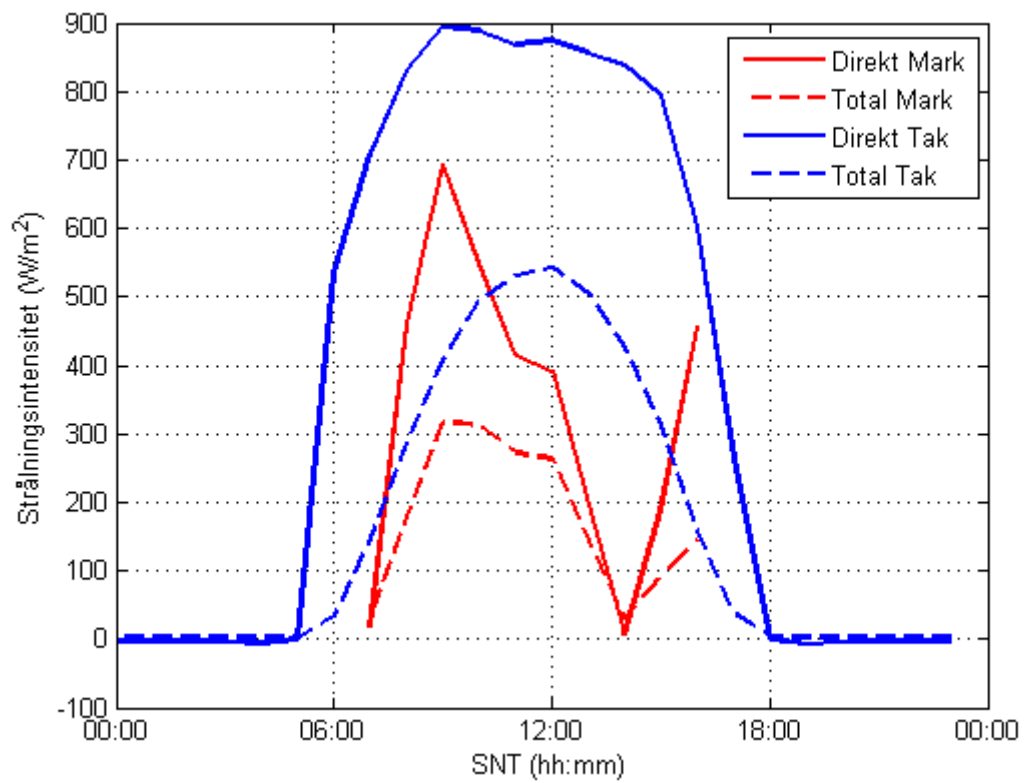
5.1.2 Skogslind, *Tilia cordata*, mätplats 2

Medeltransmissiviteten för skogslind var 0,56 för den totala strålningen respektive 0,52 för direkt strålning. Resultaten motsvarar därmed nästan exakt de för hästkastanj. Även för skogslind ses relativt kraftiga fluktuationer i transmissivitet vilket beror på den öppna kronan då trädet är avlövat och de solida grenarna som tidvis skuggar mätinstrumenten. Transmissiviteten av direkt solstrålning uppnår ett maximum på 0,93 och ett minimum på 0,01. Se Figur 17. Mellan kl 11.50 och 15.00 skuggades instrumenten av en hög byggnad. Mätvärdena från denna tid bortses från i beräkningar och analys.



Figur 17. Transmissiviteten av total och direkt solstrålning genom kronan hos två individer av *Tilia cordata* den 16 mars baserat på 10-min medelvärden.

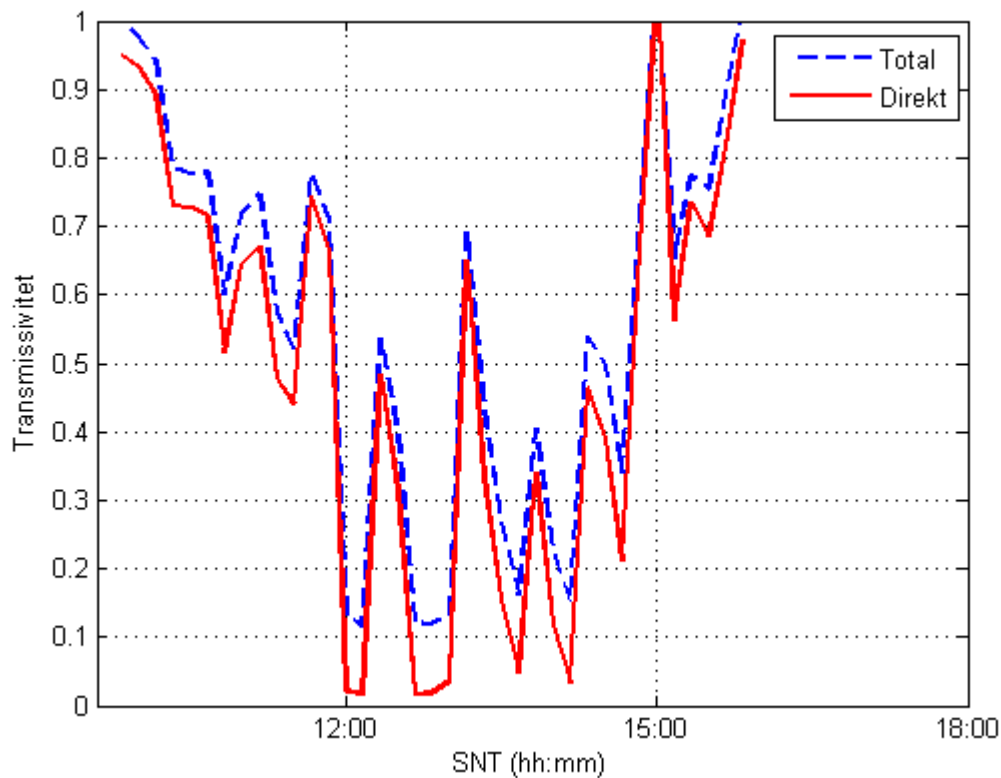
I Figur 18 kan man se hur strålningsintensiteten kraftigt sjunker i samband med att skuggan från byggnaden faller över mätinstrumenten. Detta ses på kurvorna för både direkt och total strålning under trädkronan. Kurvorna som visar strålningsintensiteten ovan kronorna är jämna och fina, vilket visar att den 16 mars var en dag med mycket klar himmel.



Figur 18. Den totala och direkta strålningen över och under skogslind baserat på 60-min medelvärden.

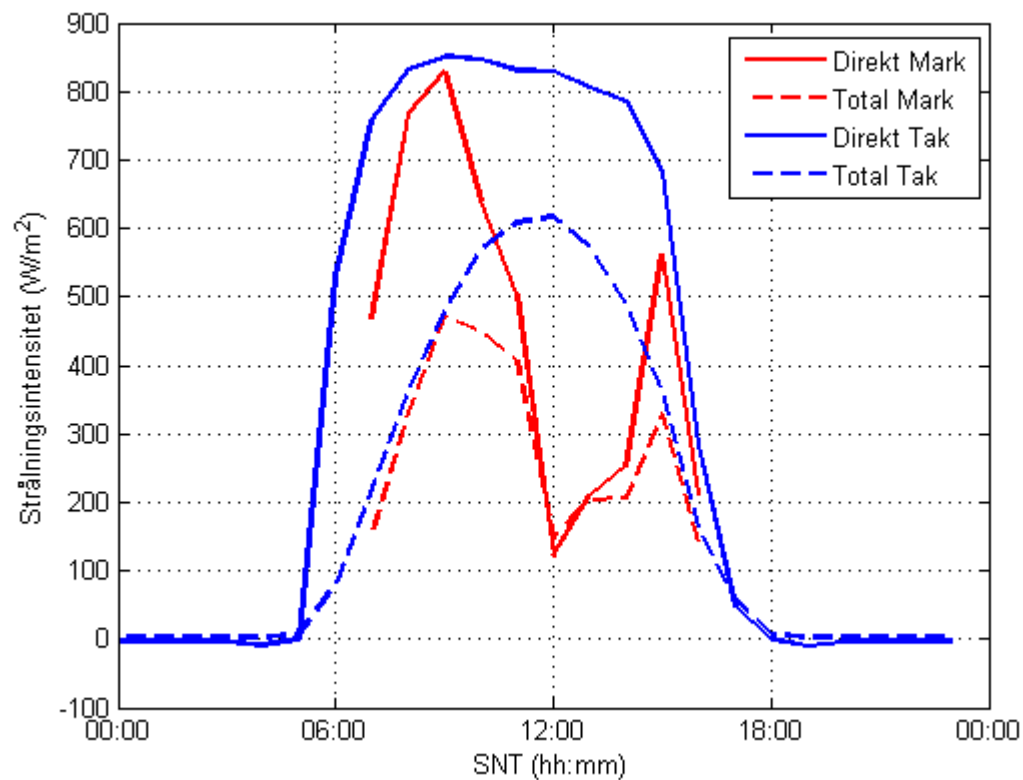
5.1.3 Vårtbjörk, *Betula pendula*, mätplats 3

För vårtbjörk var medeltransmissiviteten för total strålning 0,59 samt 0,51 för direkt solstrålning. Vårtbjörkens tre stammar skapar tre minimum i transmissivitet mitt under mätperioden. Transmissiviteten av direkt solstrålning varierar mellan 1 och 0,02, vilket ger vårtbjörken den största variationen i transmissivitet bland de undersökta träden.



Figur 19. Transmissiviteten av total och direkt solstrålning hos en trestammig individ av vårtbjörk, *Betula pendula* under den 28 mars baserat på 10-min medelvärden.

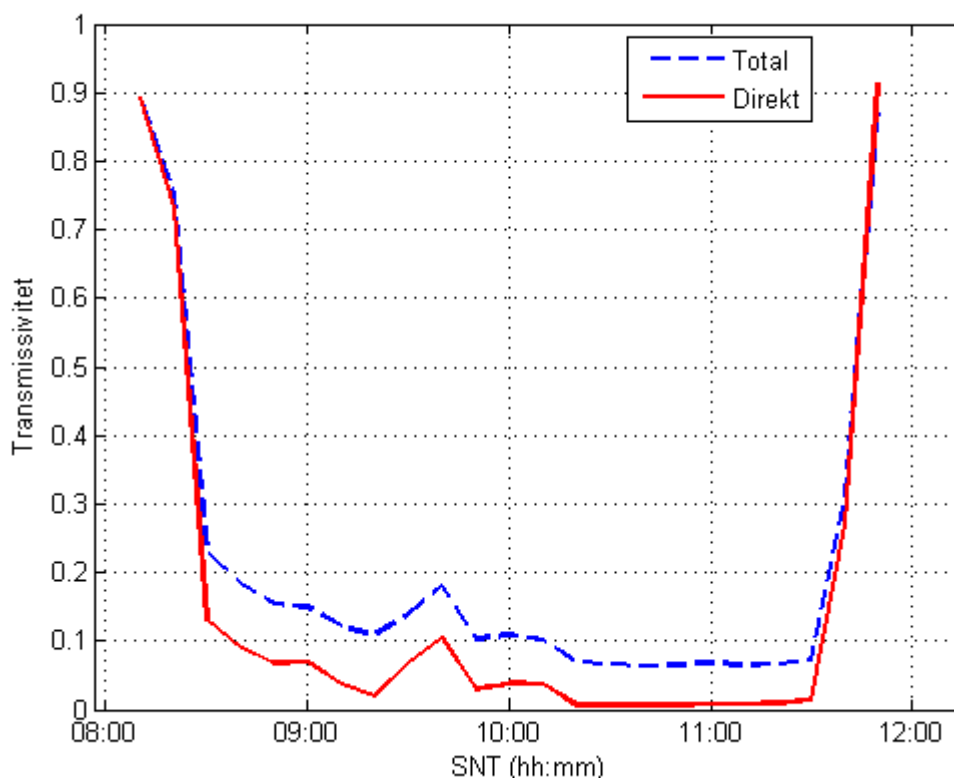
Figur 20 visar den totala och direkta strålningen ovan och under trädkronan hos denna vårtbjörk under mätdagen, den 28 mars. Kurvorna som visar strålningsintensiteten på taket är jämna och visar att även detta var en klar och solig dag. Mellan kl 12 och 15 är strålningsintensiteten som lägst i skuggan av vårtbjörken, vilket beror på en låg transmissivitet. Jämför Figur 19 och Figur 20.



Figur 20. Den totala och direkta strålningen över och under vårtbjörk, baserat på 60-min medelvärden.

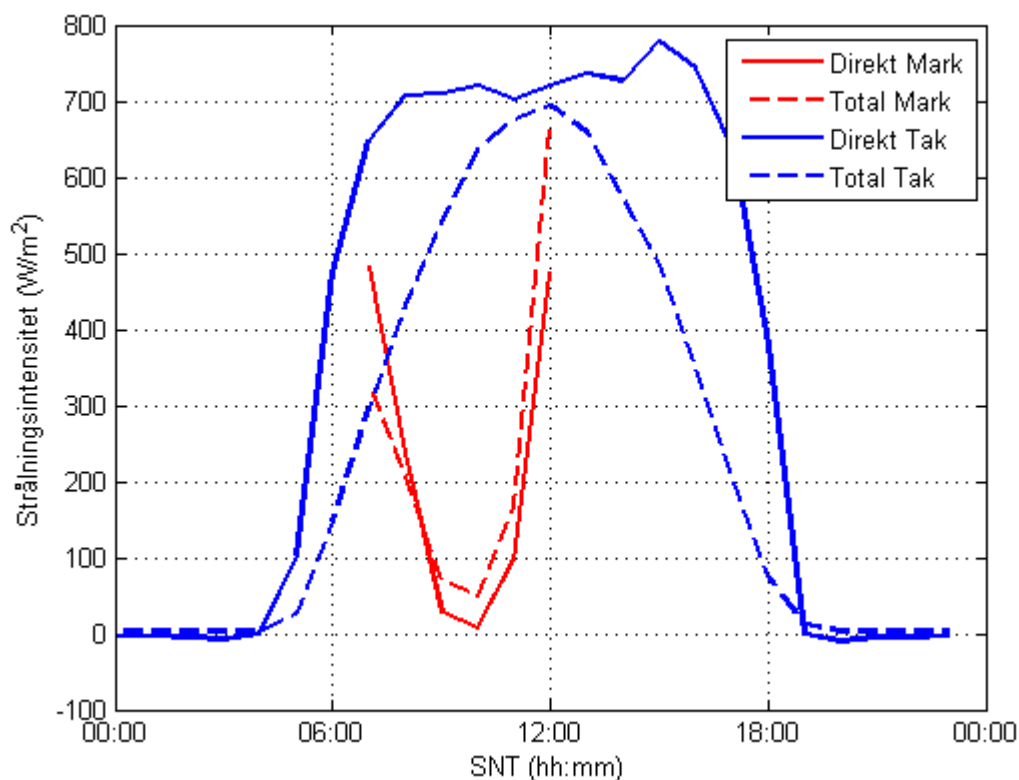
5.1.4 Svarttall, *Pinus nigra*, mätplats 4

För svarttall var medeltransmissiviteten av total strålning 0,22 och av direkt strålning 0,16. Medeltransmissiviteten var därmed mycket låg jämfört med tidigare redovisade träd. Transmissiviteten varierade mycket lite, med ett maxvärde på 0,10 och minimum på 0,01 för direkt strålning, bortsett från ytterpartierna av kronan där transmissiviteten successivt ökade utåt. Se Figur 21.



Figur 21. Transmissivitet av direkt och total solstrålning hos ett ungt exemplar av svarttall, *Pinus nigra* under den 18 april baserat på 10-min medelvärden.

Figur 22 visar strålningsintensiteten av total strålning och direkt strålning ovan och i skuggan av svarttallen. Strålningsintensiteten sjunker snabbt så snart trädet skuggar instrumenten och stiger lika kraftigt då solen passerat trädet. Den direkta strålningen ovan kronan är något lägre under dagen än den skulle vara om det var helt klart väder. Uppenbarligen har något spridit ljuset och gjort det diffust, möjligen lite högre moln eller partiklar i atmosfären under denna tid.



Figur 22. Den totala och direkta strålningen över och under svarttall baserat på 60-min medelvärden.

5.2 Himmelsexponeringsfaktorn - SVF

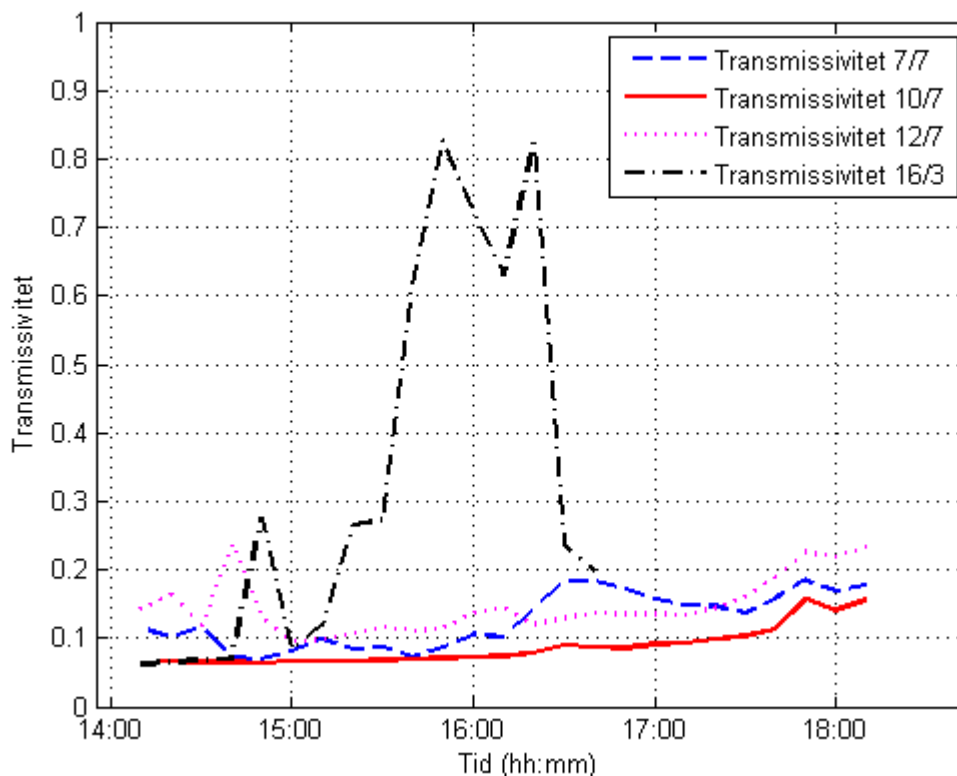
Tabell 4 visar den kalkylerade himmelsexponeringsfaktorn för de olika träden. Jämfört med dess uppmätta transmissivitet av direkt solljus.

Tabell 4. Himmelsexponeringsfaktorn och den uppmätta medeltransmissiviteten av direkt solstrålning för de olika individerna.

Individ	Himmelsexponeringsfaktor	Transmissivitet, direkt strålning
<i>Aesculus hippocastanum</i> , mätplats 1	0,59	0,52
<i>Tilia cordata</i> , mätplats 2	0,71	0,52
<i>Betula pendula</i> , mätplats 3	0,51	0,51
<i>Pinus nigra</i> , mätplats 4	0,21	0,16

5.3 Skillnad i transmissivitet mellan lövade och avlövade träd

I Figur 23 visas en jämförelse av transmissiviteten hos en skogslind i lövat respektive avlövat tillstånd. På grund av att solhöjden skiljer sig mycket åt mellan mätningarna är det endast under två timmar på eftermiddagen som solen skuggats av skogslinden både under sommarmätningarna och vårmätningen och därför är det endast dessa data som är aktuella för en jämförelse. Observera att detta är en jämförelse av den totala (globala) solstrålningen som är uppmätt, dvs. både diffus och direkt solstrålning. Datan från sommaren har inte uppmätts i den här studien. För att se hur dessa data uppmätts, se Lindberg & Grimmond (2011).



Figur 23. Transmissivitet av total solstrålning hos skogslind, *Tilia cordata* (mätplats 2) under fyra olika mättillfällen.

Värdena visar en medelskillnad i transmissivitet på 39 procentenheter mellan lövat och avlövat tillstånd. Med en transmissivitet på omkring 50 % för olövade träd och en skillnad på omkring 39 procentenheter mellan lövade och olövade träd är skillnaden i transmissivitet mellan lövat och olövad träd mindre än den mellan skuggan av ett avlövat träd och oskuggad mark (transmissivitet 1).

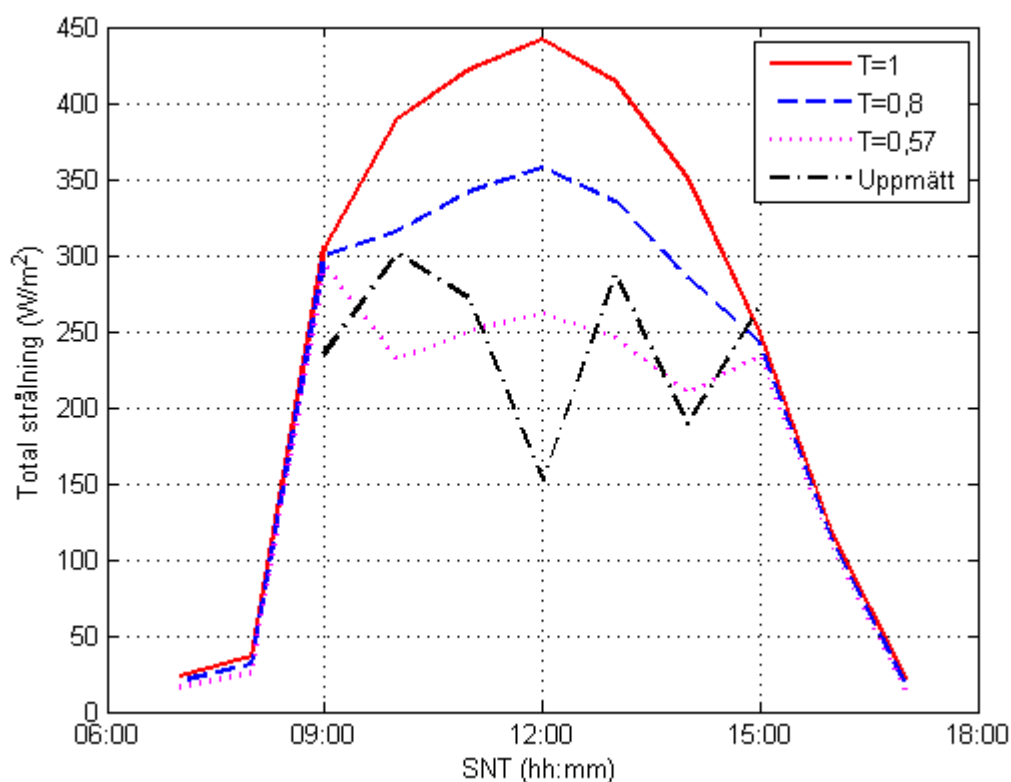
5.4 Transmissivitetens effekt på strålningstemperatur och PET

Vid en förändring av transmissiviteten blir också strålningstemperaturen på platsen förändrad, vilket i sin tur påverkar den upplevda temperaturen. I detta avsnitt visas resultaten av modelleringar av strålningstemperaturen för träd med olika transmissivitet samt PET för dessa. PET är i de här fallen

beräknade för en 35-årig man på 75 kg och med en längd på 180 cm. Aktivitetsnivån är 80 W och "kläd-värdet", dvs. hur mycket kläder som mannen har på sig är satt till 0,9.

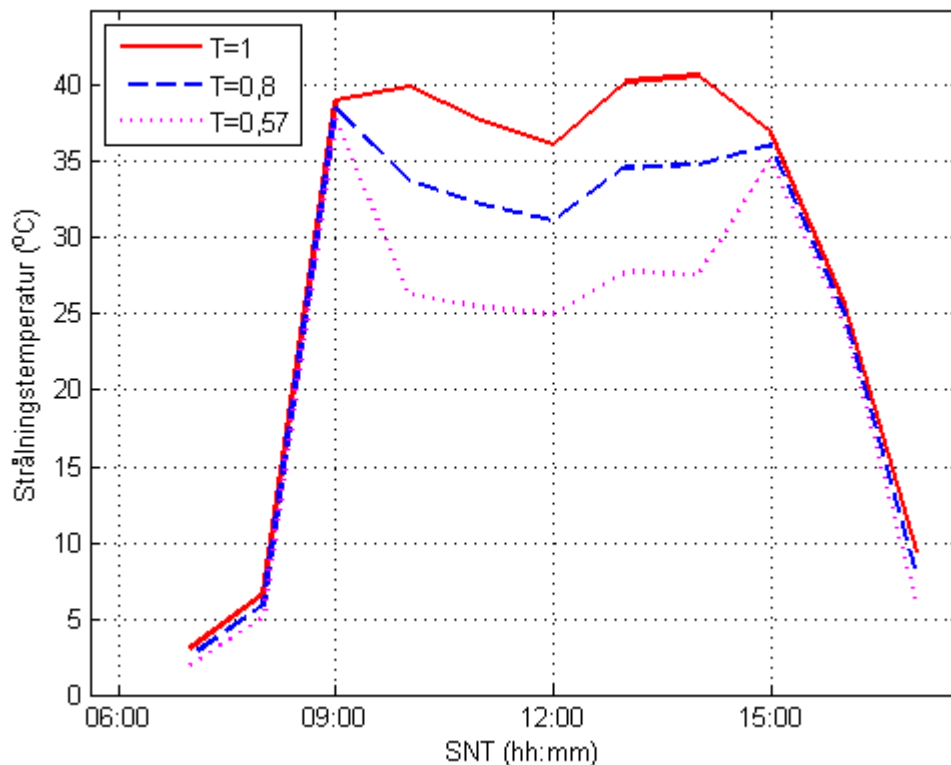
5.4.1 Hästkastanj, *Aesculus hippocastanum*

Figur 24 visar hur den totala strålningen i skuggan av trädet förändras vid en förändring av transmissiviteten hos trädet. Om trädet varit helt genomskinligt (transmissivitet 1,0) hade strålningen nått upp till omkring 440 W/m². Mätningarna visar emellertid att den totala strålningen går ner till 152 W/m² mitt på dagen då instrumenten skuggas av trädstammen. Mätningarna visade på en medeltransmissivitet hos hästkastanjen på 0,57. Den totala strålningen har också modellerats för denna transmissivitet och visar en någorlunda likartad strålningsintensitet som den uppmätta.



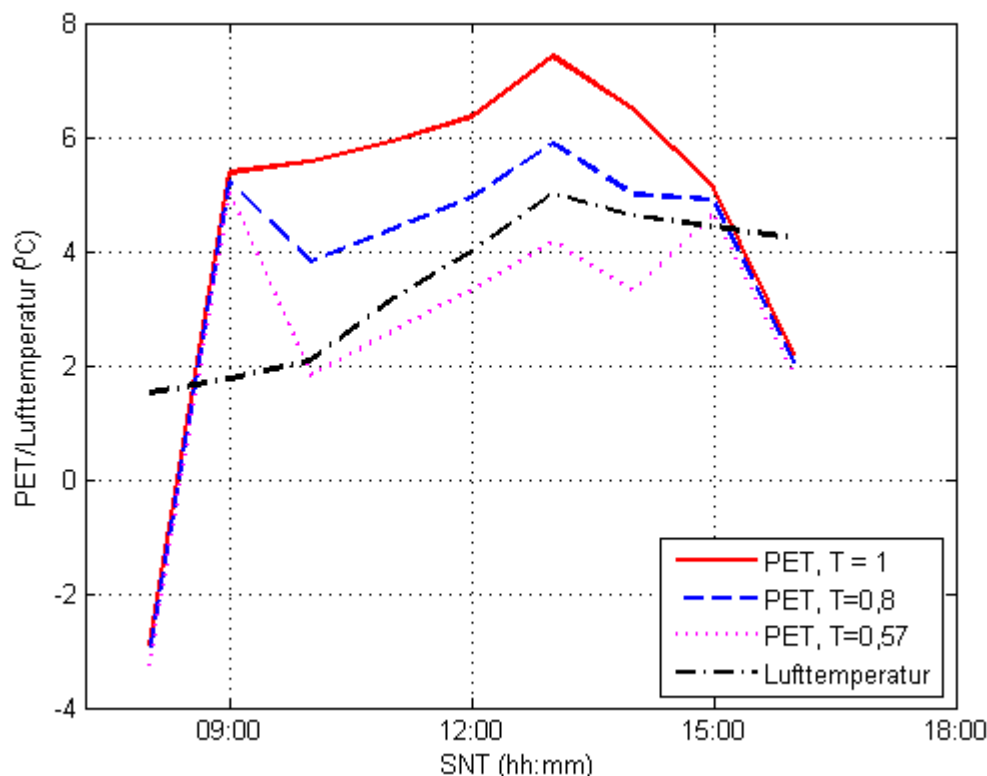
Figur 24. Den uppmätta totala strålningen under hästkastanj den 8 mars jämfört med den modellerade totala strålningen för några olika transmissiviteter samma dag. Den lägsta modellerade transmissiviteten är densamma som den uppmätta.

Figur 25 visar den modellerade strålningstemperaturen den 8 mars på mätplats 1, dvs. i skuggan av hästkastanjen. Grafen visar strålningstemperaturen för den uppmätta transmissiviteten hos hästkastanjen jämfört med strålningstemperaturen helt utan träd och jämfört med hur strålningstemperaturen skulle varit om hästkastanjen haft en transmissivitet på 80 %.



Figur 25. Den modellerade strålningstemperaturen för mätplats 1 (hästkastanj, *Aesculus hippocastanum*) för olika transmissiviteter hos trädet under mät dagen den 8 mars.

Figur 26 visar PET för samma plats under mät dagen. Den uppmätta transmissiviteten hos trädet var 0,57 (57 %) och denna används i modellering och beräkning av PET. Den upplevda temperaturen i skuggan av trädet ligger nära lufttemperaturen, men något lägre för större delen av tiden då trädet skuggar. Utan trädet skulle temperaturupplevelsen ligga några grader högre denna dag. Se den röda kurvan för transmissivitet 1. Om trädets transmissivitet varit 0,8 (80 %) hade den upplevda temperaturen i skuggan av trädet varit någon grad högre än lufttemperaturen.

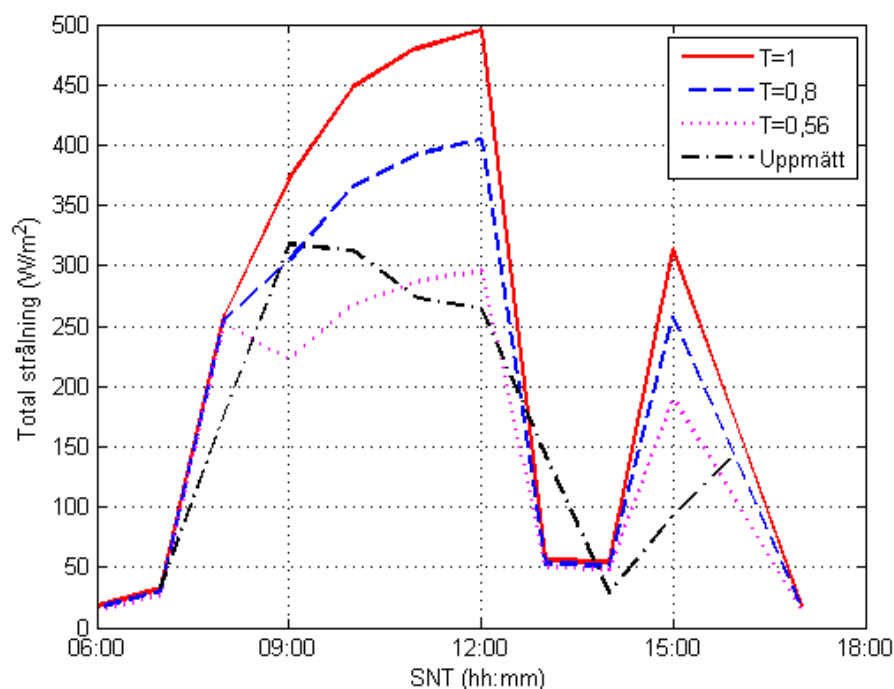


Figur 26. PET för mätplats 1 (hästkastanj - *Aesculus hippocastanum*) med uppmätt transmissivitet (0,57), en transmissivitet på 0,8 samt total transmissivitet (1) jämfört med den uppmätta lufttemperaturen.

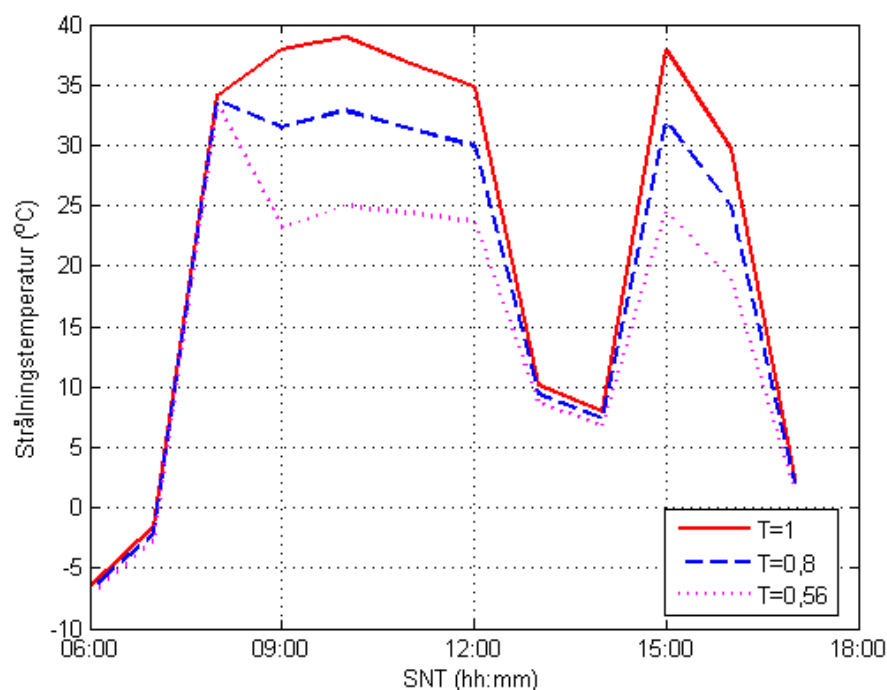
5.4.2 Skogslind (*Tilia cordata*)

Figur 27 visar hur den totala strålningen i skuggan av trädet förändras vid en förändring av transmissiviteten hos trädet. Om trädet varit helt genomskinligt (transmissivitet 1,0) hade strålningen nått upp till omkring 500 W/m^2 . Mätningarna visar dock att den totala strålningen går ner till ca 50 W/m^2 mitt på dagen då instrumenten skuggas av trädstammen. Mätningarna visade på en medeltransmissivitet hos skogslinden på 0,56. Den totala strålningen som har modellerats för denna transmissivitet ligger relativt nära den uppmätta.

Figur 28 visar hur strålningstemperaturen förändras vid en förändring av transmissiviteten. Figur 28 visar strålningstemperaturen för skogslind med olika transmissivitet på mätplats 2 den 16 mars jämfört med om där inte skulle vara något träd alls (transmissivitet 1). Man kan se hur kurvan kraftigt går ner mellan kl 13 och 14. Det var en hög byggnad som skymde solljuset under denna tid.

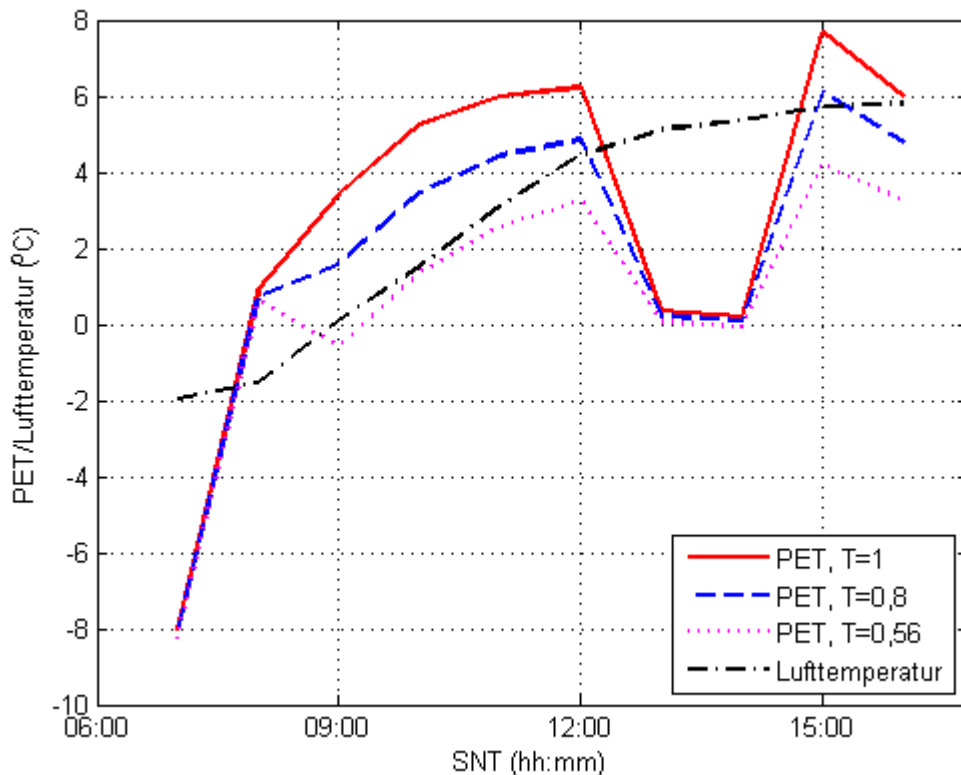


Figur 27. Den uppmätta totala strålningen under skogslind den 16 mars jämfört med den modellerade totala strålningen för några olika transmissiviteter samma dag. Den lägsta modellerade transmissiviteten är densamma som den uppmätta.



Figur 28. Den modellerade strålningstemperaturen för mätplats 2 (skogslind, *Tilia cordata*) för olika transmissiviteter hos trädet under mät dagen den 16 mars.

Figur 29 visar PET för mätplats 2 för mättdagen den 16 mars 2011. Lufttemperaturen steg långsamt under hela mätperioden och PET följer denna kurva. För trädets uppmätta transmissivitet på 0,56 (56 %) är den upplevda temperaturen i skuggan av skogslinden denna dag något lägre än lufttemperaturen. Om trädet inte fanns skulle PET vara upp till omkring 3 grader högre än det var med uppmätt transmissivitet på samma plats. Observera den stora skillnaden mellan lufttemperatur och upplevd temperatur då solen skuggas av den stora byggnaden.

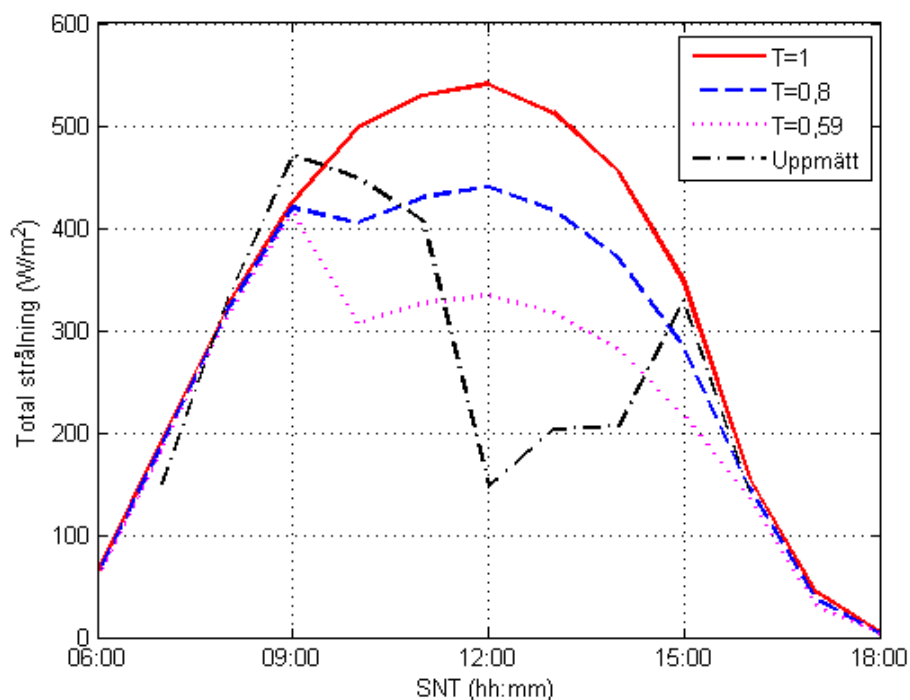


Figur 29. PET för mätplats 2 (skogslind - *Tilia cordata*) med uppmätt transmissivitet (0,56), en transmissivitet på 0,8 samt total transmissivitet (1) jämfört med den uppmätta lufttemperaturen.

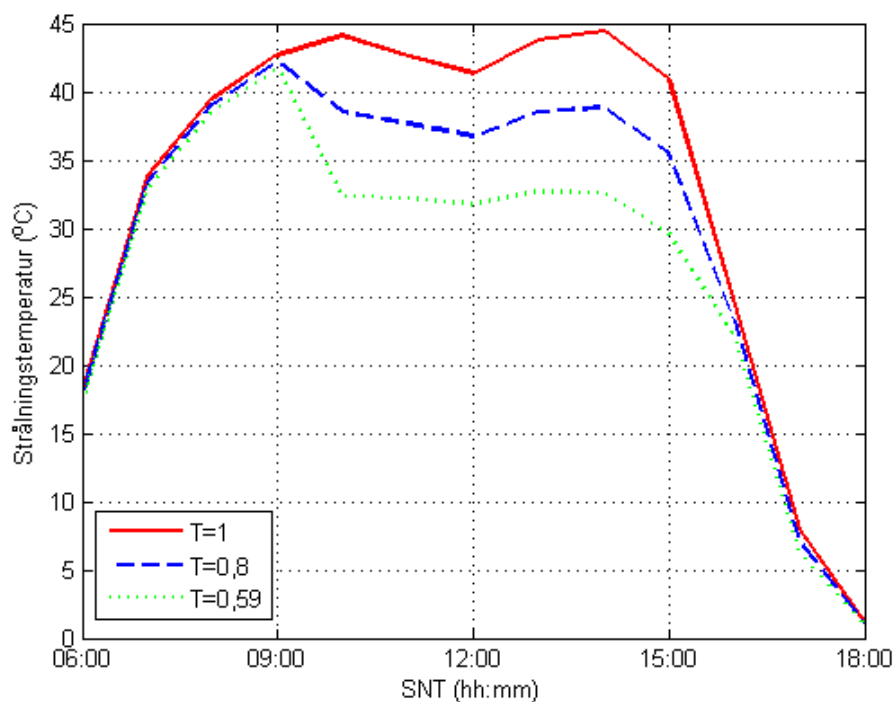
5.4.3 Vårtbjörk, *Betula pendula*

Figur 30 visar att även för vårtbjörken spelar transmissiviteten roll för strålningsintensiteten i skuggan av trädet. Dock fluktuerar den uppmätta mer än den modellerade. Den modellerade strålningen för en transmissivitet på 1 ger en strålningsintensitet på knappt 540 W/m², medan uppmätt strålningsintensitet varierade mellan 470 och 140 W/m² med en tonvikt på de lägre värdena.

Figur 31 visar den modellerade strålningstemperaturen på mätplats 3 den 28 mars. Kurvorna visar hur strålningstemperaturen förändras med en förändrad transmissivitet hos vårtbjörken och strålningstemperaturen om trädet inte funnits (transmissivitet 1).

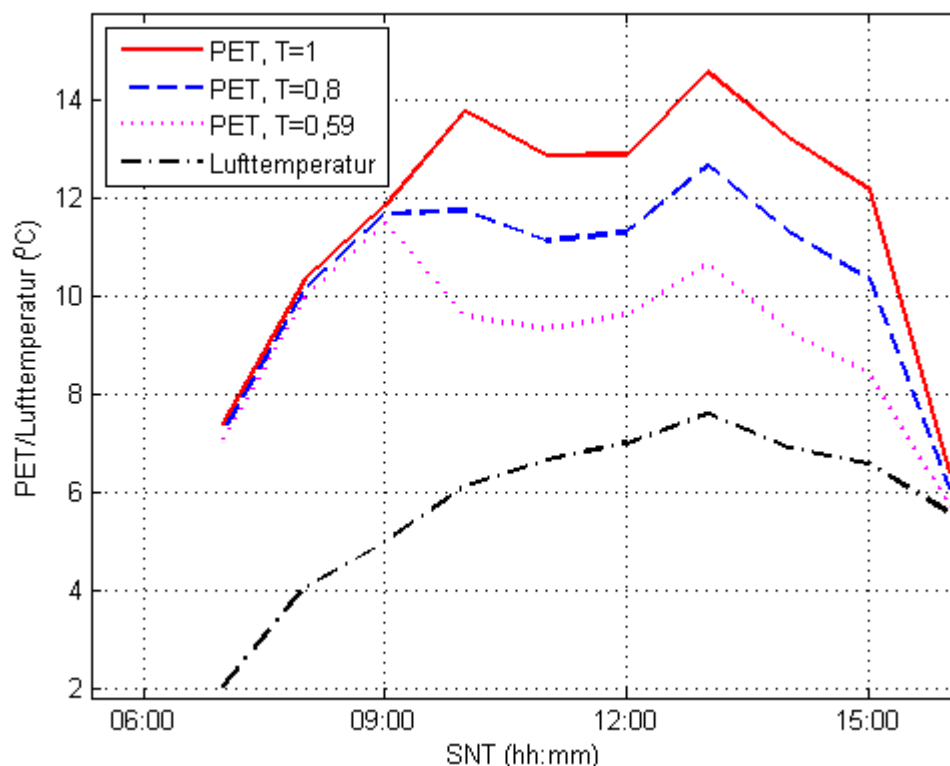


Figur 30. Den uppmätta totala strålningen under vårtbjörk den 28/3 jämfört med den modellerade totala strålningen för några olika transmissiviteter samma dag. Den lägsta modellerade transmissiviteten är densamma som den uppmätta.



Figur 31. Den modellerade strålningstemperaturen för mätplats 3 (Vårtbjörk, Betula pendula) för olika transmissiviteter hos trädet under mättdagen den 28 mars.

Figur 32 visar PET för mätplats 3 under mät dagen den 28 mars 2011. Grafen visar att den upplevda temperaturen i det här fallet är flera grader varmare än lufttemperaturen. Det är dock upp till fem graders skillnad mellan PET i skuggan av trädet med den uppmätta transmissiviteten (0,59) och exemplet helt utan träd (transmissivitet 1,0).

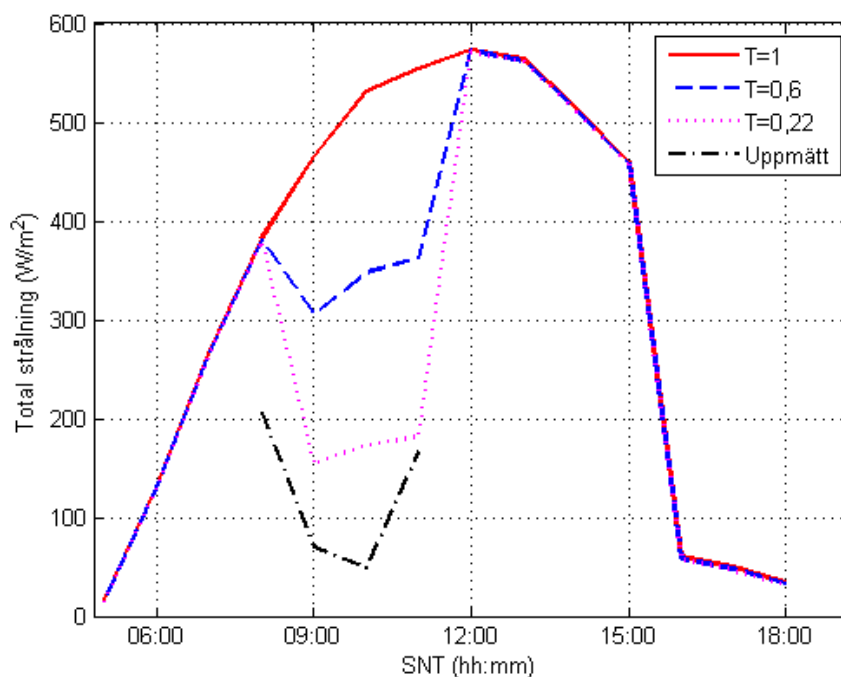


Figur 32. PET för mätplats 3 (vårbjörk - *Betula pendula*) med uppmätt transmissivitet (0,59), en transmissivitet på 0,8 samt total transmissivitet (1) jämfört med den uppmätta lufttemperaturen.

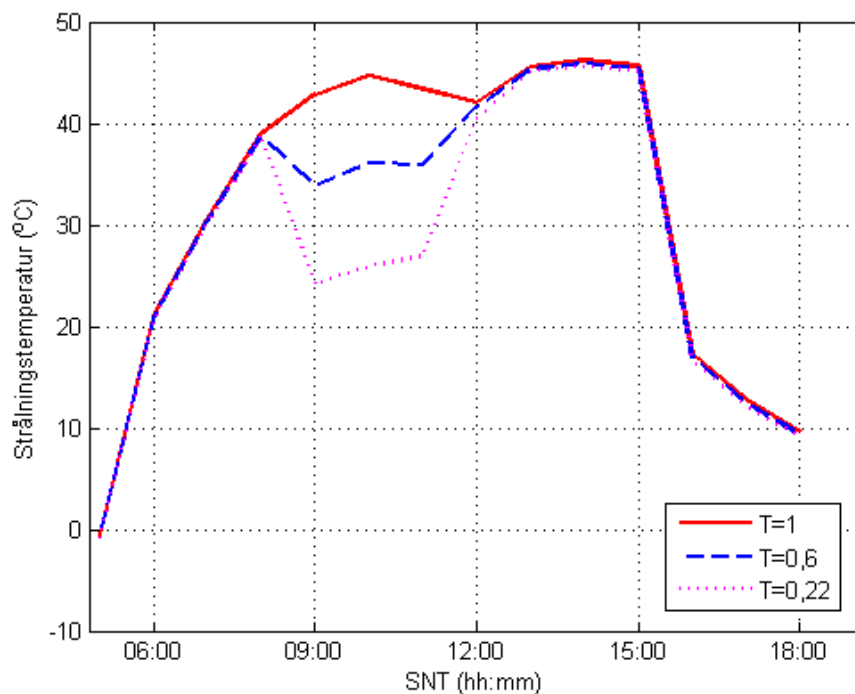
5.4.4 Svarttall (*Pinus nigra*)

I Figur 33 redovisas hur strålningen under svarttallen varierar för tre olika transmissiviteter på trädet. För total transmissivitet visar modellen en total strålning på mätplatsen på upp till omkring 550 W/m². Uppmätta värden på platsen visar dock att tallen skuggar så mycket så att den totala strålningen reduceras till mellan 50 och 70 W/m².

Figur 34 visar hur strålningstemperaturen förändras vid en förändring av transmissiviteten. Figur 34 visar strålningstemperaturen för mätplats 4 den 18 april, där mätobjektet svarttallen fått olika transmissiviteter.

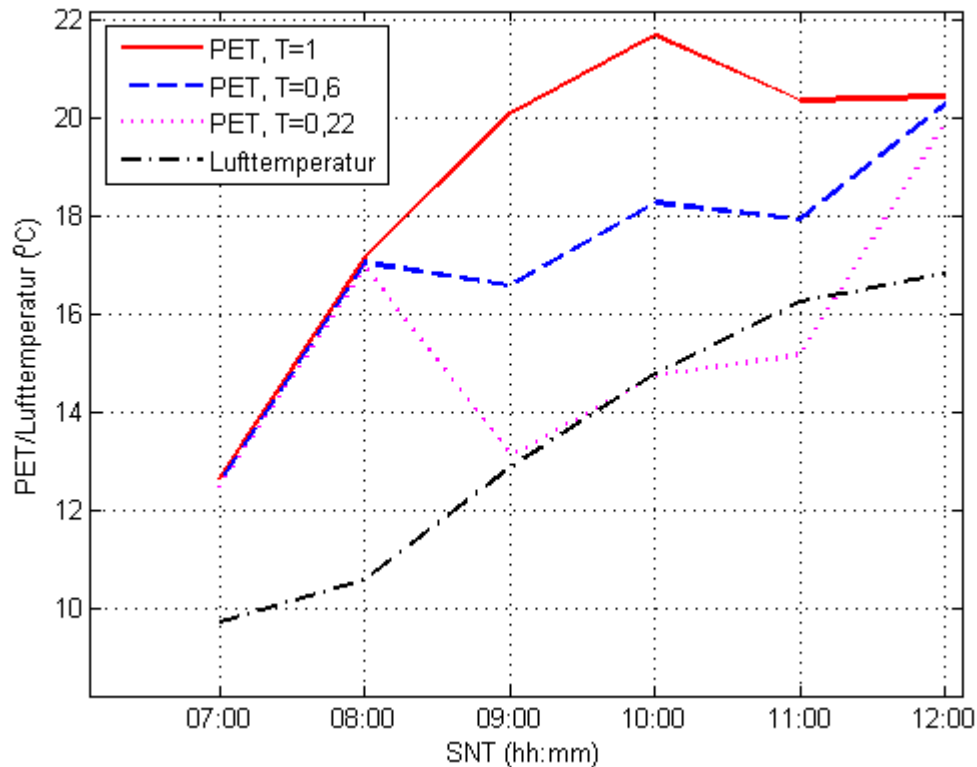


Figur 33. Den uppmätta totala strålningen under svarttall den 18 april jämfört med den modellerade totala strålningen för några olika transmissiviteter samma dag. Den lägsta modellerade transmissiviteten är densamma som den uppmätta.



Figur 34. Den modellerade strålningstemperaturen för mätplats 4 (svarttall, Pinus nigra) för olika transmissiviteter under mättdagen den 18 april.

Figur 35 visar PET för mätplats 4 under mätdagen den 18 april 2011. Den upplevda temperaturen bakom svarttallen med den låga transmissiviteten 0,22 (22 %) är mycket lik lufttemperaturen i det här fallet. Om trädet inte hade funnits där hade temperaturupplevelsen blivit omkring 7 grader varmare på samma plats.



Figur 35. PET för mätplats 4 (Svarttall - Pinus nigra) med uppmätt transmissivitet (0,22), en transmissivitet på 0,6 samt total transmissivitet (1) jämfört med den uppmätta lufttemperaturen.

6 Diskussion

Detta kapitel är indelat i två sektioner. I den första diskuteras resultaten av den empiriska studien, felkällor och tolkningar. I del två diskuteras studiens betydelse för planering och hållbar utveckling.

6.1 Resultatdiskussion

6.1.1 Transmissivitet

Mina resultat överensstämmer med de för en studie av Abreu & Labaki (2008), som vintertid uppmätte en transmissivitet av total strålning hos *Tabebuia chrysotricha* (eng Golden trumpet tree) på 53,9 %. Liakatas et al (2002) fann en transmissivitet av total strålning på över 40 % hos en avlövad skog av *Quercus frainetto* (ungersk ek), vilket också får anses överensstämma med mina resultat. Transmissiviteten är något lägre än i min studie, troligen på grund av att de har studerat en hel skog där strålningen från en låg sol skärmas av av flertalet träd innan de når instrumenten. För övrigt har jag inte hittat några andra studier som är jämförbara med denna.

Mätplats 2 har inte varit optimal för ändamålet då instrumenten skuggades av flera individer, men mätplatsen valdes ändå för att kunna göra jämförelsen mot sommarvärden.

Den direkta strålningen är mycket högre än den totala strålningen i alla mätningar. Detta beror på att denna är beräknad och visar den direkta strålningen mot ett mot solen vinkelrätt plan.

Transmissiviteten av direkt solstrålning skiljer sig inte mycket från den av total strålning, men är dock något lägre. Den globala strålningen innefattar också diffus och reflekterad strålning, så det är väntat att denna är högre. Den diffusa strålningen som nått instrumenten kommer från luftpartiklar och reflekterad strålning från reflektioner hos omkringliggande material.

Det har inte haft någon betydelse för resultaten vad gäller transmissivitet hur nära stammen instrumenten stått. Ju närmare stammen instrumenten står desto längre står de i skugga av stammen, men stammens andel av kronan är ändå lika stor. Däremot så spelar avståndet till stammen tillsammans med solhöjden roll eftersom vägen genom kronan beror på dessa två parametrar. Vid jämförelsen av transmissivitet hos avlövade och lövade träd har solen gått olika väg genom kronan och ger mindre jämförbara resultat. För att få exakt jämförbara resultat borde mätplatserna vintertid respektive sommartid varit justerade efter solhöjden så att solens väg genom kronan sett från mätinstrumenten varit så lika som möjligt.

Uppvärmningen av urbana material påverkas inte av våglängden hos strålningen enligt Lachéade et al (2005). Det är därför av mindre betydelse för stadens uppvärmning att träd tar upp större mängd strålning i våglängdsområdet PAR (fotosyntetiskt aktiv strålning).

Den stora variationen i transmissivitet hos vårtbjörken visar att den är mer genomsläpplig i kronan jämfört med stammen. Detta skiljer sig från de andra studerade träden, där variationerna är mindre. Att mätningarna skedde vid en trestammig individ kan ha sänkt medelstransmissiviteten. Vårtbjörk har därmed troligen en högre transmissivitet än hästkastanj och skogslind.

Transmissiviteten varierar allteftersom solen rör sig genom trädkronan. Fluktuationerna hos ett avlövad träd är mycket stora. Detta syns tydligast i Figur 15, Figur 17, Figur 19 och Figur 21, som visar transmissiviteten hos träden med 10-minutersmedelvärden. Minutvärden hade visat ännu tydligare fluktuationer. Mätvärdena från svarttallen visar att mot utkanten av kronan ökar transmissiviteten (Figur 21). Detta är inte lika tydligt hos de avlövade träden, men antagligen fås samma effekt då dessa är lövade.

6.1.2 Himmelsexponeringsfaktorn

Himmelsexponeringsfaktorn behöver studeras mer för att det ska gå att dra några slutsatser. En studie av endast tre lövfällande individer räcker inte för att visa några säkerställda samband, men mina resultat indikerar att det vore intressant att studera detta vidare.

Om man lyckas klargöra ett samband mellan himmelsexponeringsfaktorn och transmissiviteten kan 180-graders himmelsfoton räcka för att göra en snabbanalys av transmissiviteten.

6.1.3 Skillnad i transmissivitet mellan lövat och avlövad träd

Denna jämförelse, som illustreras i Figur 23 är en mycket provisorisk sådan. De första tre mätningarna var inte en del av den här studien och designades inte för ändamålet. Här finns många felkällor. Variationerna i solhöjd gör att solen tar olika väg genom kronan, vilket gör värdena inte helt jämförbara. Det finns inga uppmätta värden på diffus strålning så att den direkta strålningen på platsen kan räknas ut sommartid. Detta gör att även diffus och reflekterad strålning räknas med i jämförelsen. Även om alla mätningar gjordes vid klart väder kan det finnas olika tillfälligheter, t.ex. mer partiklar i luften och ökad reflektion hos material runtomkring, som gör att andelen diffus strålning blir högre. Tar man dessa värden med en nypa salt så visar ändå resultatet på skillnaderna i transmissivitet i stora drag.

6.1.4 Transmissivitetens effekt på strålningstemperatur och PET

Man kan se att i alla fyra fall sker en förändring av strålningstemperaturen på 0,22-0,32 grader per procentenhet transmissivitet. Observera att dessa värden baseras på meteorologiska data från just dessa mät dagar och går inte att appliceras på andra dagar.

Strålningstemperaturen är modellerad med hjälp av tim-medelvärden och kurvorna ser därför mycket jämna ut. Om det vore möjligt att modellera varje minut för sig hade grafen sett mer varierad ut eftersom transmissiviteten varierar stort från minut till minut. Men då en människa är relativt stor jämfört med de tunnare grenarna upplevs troligen inte denna skillnad, som ett mindre instrument skulle kunna uppfatta. Skuggan av trädstammen upplevs dock som kallare än kronan eftersom den är så bred.

Figur 32 visar PET för mätplats 3 under mät dagen den 28 mars 2011. Differensen mellan PET och lufttemperatur är i det här fallet mycket högre än i övriga tre fall. Detta beror troligen på att mätplatsen kantas av högre byggnader relativt nära i söder. Dessa ger ett tillskott av långvågig strålning till platsen. Mättillfället är också senare på säsongen än de tidigare två, vilket har betydelse för strålningsintensiteten genom en högre solhöjd och en kortare väg genom atmosfären.

Vid modelleringarna i SOLWEIG var det svårt att matcha den exakta mätplatsen eftersom SOLWEIG inte innehåller några mätverktyg. Detta kan betyda att modelleringarna har viss felmarginal. Förskjutningen av kurvorna i x-led för modellerade värden i Figur 30 jämfört med kurvan för uppmätta värden i samma figur beror troligen på detta.

När det gäller SOLWEIG kan man se en större felmarginal vid modellering av total strålning vid svarttallen på mätplats 4. Detta kan bero på en svaghet i modelleringen som förstärks vid låga transmissiviteter.

Skillnader mellan modellens kurvor och uppmätta värden beror på modellens sätt att hantera trädens arkitektur. De enkla formerna av cylinder, kon och oval form motsvarar inte verkligheten. Dessa former är i modellen homogena, vilket ett träd naturligtvis inte är. Att vårtbjörken har tre stammar gör det svårt att jämföra uppmätta värden med modellerade värden. Modellen kan ännu inte hantera flerstammiga individer.

Om man jämför kurvorna för strålningstemperatur och lufttemperatur med kurvorna för PET, tex. i Figur 25 och Figur 26 ser man att de två förstnämnda har inflytande på PET, vilket också stämmer överens med teorin, som säger att det bland annat är dessa två faktorer som påverkar. Modellen är givetvis baserad på denna teori.

PET-värdena är beräknade på vårens svaga strålning. På sommaren är strålningen starkare i och med en högre solhöjd och då påverkar transmissiviteten mer. Man kan då räkna med att få större differenser i PET för olika transmissiviteter när solhöjden stiger. En ask som slår ut mycket sent är det därmed viktigare att veta transmissiviteten hos för att kunna modellera ett så korrekt PET som möjligt under tidig sommar.

6.2 Studiens betydelse

6.2.1 Stadsklimat och komfort

Studien visar att stadsträd har en stor påverkan på stadsklimatet genom sin skuggverkan, både i lövat och avlövad tillstånd. Att lövfällande träd skuggar så mycket även vintertid är nytt och något som påverkar temperaturklimatet mer än känt.

Den låga solhöjden vi har här i Skandinavien på grund av vårt nordliga geografiska läge gör att skuggmönstren är långa även då solen står som högst. Detta gör att transmissiviteten påverkar mycket även då. Vintertid blir skuggorna extremt långa och transmissiviteten har en mycket hög påverkan på den totala soltillgången.

Med hjälp av träd kan skuggverkan erhållas och med ett aktivt artval kan man få olika kraftig skugga, vilken kan vara olika lämplig för olika typer av platser. Vårtid kan det vara behagligt med en varm och solig plats för utevistelse, t.ex. i form av en uteservering. På sommaren kan den platsen bli outhärdligt varm, vilket talar för att utnyttja lövfällande träd som skuggar när det behövs. Man ska då dock vara medveten om den relativt låga transmissiviteten hos avlövade träd, vilket gör platsen märkbart svalare även under vinter och vår.

Den halvskugga som träd ger är varm och behaglig till skillnad från en skugga från en byggnad eller andra material som inte släpper igenom någon strålning. Där känns klimatet ofta kallt och fuktigt. Skillnaden i PET mellan öppen plats och denna blir otroligt mycket större än mellan öppen plats och skuggan av ett träd.

6.2.2 Planering

Man kan göra klimatplaneringar på alla planeringsnivåer, men resultaten i den här studien kommer till användning först i detaljplaneringen. Möjligen kan man på områdesnivå planera för att vegetation ska få plats.

Vid detaljplanering så bestäms himmelsexponeringsfaktorn genom bebyggelsens täthet och geometri samt genom placeringen av träd. Vi väljer också färg, vilket påverkar albedo. För att vi ska få en klimatologiskt hållbar stad så krävs det att planerarna besitter kunskaper kring detta och lägger vikt vid dessa aspekter i sitt arbete.

Om man som stadsplanerare eller arkitekt i ett projekt riskerar att en plats blir för varm och solig bör man lösa detta med skugga, inte med vindavkylning på grund av att vi är mycket känsliga för vind. Kombinationen vindskydd och skugga är alltså optimal, men måste förstås varieras med olika öppna miljöer. Med tanke på att den upplevda temperaturen är relativ och beror på bland annat aktivitet och klädsel så bör man i klimatplaneringen också ta hänsyn till vilken typ av aktivitet som ska pågå på platsen.

Det är viktigt för stadsplanerare att ha god artkännedom, inte bara för att ståndortsmässigt kunna välja rätt stadsträd till stadsklimatet. Att känna till arters lövorientering kan också vara av vikt vid klimatplaneringen. Personligen anser jag dock att det är av större vikt att planerare innehar kunskaper om arters ståndortskrav och skötselkrav. Det är ju trots allt så att ett levande och välmående träd skuggar bättre och ger ett attraktivare estetiskt intryck än ett halvdött träd, oavsett art.

Arten verkar ha mindre betydelse för transmissiviteten i avlöst tillstånd, men i löst tillstånd är skillnaderna i transmissivitet förmodligen högre beroende på lövens orientering, placering och tjocklek. Löven kommer och fälls ju också vid olika tidpunkter, vilket kan vara av stort värde. Här i Sverige, där värmen kommer sent på året är det kanske fördelaktigt med träd som slår ut så sent som möjligt.

SOLWEIG kan på sikt bli ett användbart verktyg för planerare, för att kunna göra en klimatbedömning av planerade områden. Med ett allt varmare klimat och med tanke på livslängden hos stadsrum är klimatplaneringen redan idag oerhört viktig. Detta bör tas med i alla planeringsprojekt för att skapa hållbara städer. Ett kanske enklare sätt att bedöma strålningsförhållandena på en plats är att studera hur snösmältningen sker.

6.2.3 Hållbar utveckling

En hållbar stadsutveckling integrerar sociala, ekonomiska och ekologiska aspekter till en livsmiljö som alla trivs med. Med ett allt varmare klimat är det allt mer viktigt att skapa behagliga uterum för

människor att vistas i. Det kan bli värmeböljor även här i Norden och för människors välmående måste vi planera för detta.

Ur en social synvinkel kan man se att välanvända uterum också har ett behagligt mikroklimat. Det är ingen slump att människor inte väljer att uppehålla sig länge på en blåsig plats. Ett led i en social hållbar stad är att skapa attraktiva uterum där människor kan träffas och interagera med varandra. Ju fler kontaktytor vi får mellan människor desto större integration och ömsesidig förståelse når vi. Att använda stadsträd i hårdgjorda miljöer bidrar till ett behagligare klimat sommartid, så att människor får möjlighet att stanna upp, kanske samlas under trädet och byta några ord.

Med en ekologisk vinkel kan vi se att stadsträd bidrar till en ökad biologisk mångfald i staden, inte bara genom sin existens och genom boendemiljöer för djurlivet utan också med dess klimatpåverkande effekt. Med ett stadsklimat som inte värms upp i alltför hög utsträckning finns det möjligheter för organismer att stanna i staden. Men detta måste förstås kombineras med andra grön-blå åtgärder som främjar ett biologiskt liv. Med en hållbar biologisk mångfald som mål måste också trädarterna varieras i största möjliga mån.

Med ett ekonomiskt synsätt kan vi se att stadsträd som temperatursänkare kan bidra till att sänka energiförbrukningen genom att skugga söderriktade fönster så att mindre luftkonditionering krävs. I Norden rekommenderar jag dock inte detta förfaringssätt då uppvärmningsbehovet är större och avlövade träd hindrar den svaga vinterstrålningen från att nå in i byggnader. En bibehållen biologisk mångfald bidrar till ekosystemtjänster som är vitala för oss och kan bli oerhört kostsamma att ersätta. Ur ett långsiktigt perspektiv kan man också anta att ökade socialiseringsmöjligheter tillsammans med andra åtgärder minskar utanförskap och segregering, vilkas följder är mycket kostsamma.

Skötseln av trädet påverkar dess grensättning och därmed också dess skuggförmåga. Det är rimligt att anta att ett frekvent beskuret träd, som växer sig tätt har lägre transmissivitet än ett icke beskuret. Vissa arter fäller sina löv i skugga beroende på stora krav på solljus. Vid vattenbrist fälls också blad hos alla träd. Detta innebär också att transmissiviteten påverkas av utomstående beskaffenheter, som inte enbart beror på art utan även på sambandet mellan art och dess växtmiljö. Med ett varmare klimat blir det allt svårare för våra stadsträd att överleva och må bra. Överhettning är ett ständigt hot som träden försöker lösa genom emission av långvågig strålning och transpiration. När vattenmängderna i staden sinar minskar trädens förmåga att hantera värmen. Att finna arter som kan överleva och frodas i den här miljön är därför en nyckelfråga som sätter gränserna för användandet av stadsträd ur alla aspekter.

7 Slutsatser

Transmissiviteten hos lövfällande träd är relativt hög även i avlövad tillstånd. Knappt 50 % av inkommande direkt solstrålning skärmas av, vilket leder till att det upplevda temperaturklimatet i skuggan av ett avlövad träd är märkbart kallare än direkt solbelyst plats. Med en så låg transmissivitet vintertid är det viktigt att ta hänsyn till denna vid modelleringar även av vinterklimatet.

Vid användning av lövfällande träd som klimatjusterare vid byggnader kan man räkna med en högre energianvändning för uppvärmning vintertid än om fönstren inte skymts av träd. Lövfällande träd bör inte användas som skuggkastare vid sittplatser utomhus om man vill maximera solinstrålningen under våren.

Olika lövfällande arter verkar ha relativt likartad transmissivitet i avlövad tillstånd, mellan 50 och 55 %. Skillnaden i transmissivitet mellan avlövade och lövade träd kan vara så lite som 39 procentenheter trots en låg transmissivitet då de är lövade.

7.1 Vidare forskning

Detta är bara en förstudie i ämnet och det bör studeras vidare. Fler arter bör undersökas. För att kunna göra en relevant bedömning av skillnaderna i transmissivitet mellan lövade och avlövade träd måste mätningar göras då träden är fullt lövade så att direkt strålning kan räknas ut.

Fler arter behöver studeras för att kunna dra en statistiskt säkerställd slutsats vad gäller variationen i transmissivitet hos olika arter.

För att exakt kunna jämföra transmissiviteten mellan lövade och avlövade träd bör instrumenten flyttas mellan mätningarna så att solkurvan genom träden går samma väg genom kronan.

Det vore intressant att vidare studera sambandet mellan bladyteindex och transmissivitet, vilket kräver större fysikkunskaper än vad jag själv besitter. Instrumentet LI-COR-LAI 2200Plant Canopy Analyzer⁹, som kan mäta bladyteindex hos enskilda träd, skulle vara användbart i en sådan studie.

En god hjälp för planeringen skulle vara en studie av olika arters förväntade bladyteindex i stadsmiljö vid full höjd.

⁹ Se vidare: http://www.licor.com/env/products/area_meters/LAI-2200/

8 Källförteckning

- De Abreu L.V. & Labaki, L.C. (2008). 648: Evaluation of the radius of influence of different arboreal species on microclimate provided by vegetation. [Elektronisk] Tillgänglig: <http://architecture.ucd.ie/Paul/PLEA2008/content/papers/poster/PLEA_FinalPaper_ref_648.pdf> (2011-01-27) *PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd to 24th October 2008*.
- Baldocchi D.D., Matt D.R., Hutchison B.A. & McMillen R.T. (1984). Solar radiation within an oak-hickory forest: an evaluation of the extinction coefficients for several radiation components during fully-leafed and leafless periods, *Agricultural and Forest Meteorology* 32: 307–322.
- Biswas, G. (2007). Some new leaf normal-angle distribution models and their influence on geometry functions and area scattering phase functions related to radiative transfer problems in vegetative canopies. *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* 108:197-219.
- Brown, Robert D. & Gillespie, Terry J. (1995). *Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency*. New York, N.Y.: John Wiley
- Bygg för morgondagens klimat: anpassning av planering och byggande*. 1. uppl. (2009). [Online, PDF] (2009-06-05) Tillgänglig: <http://www.boverket.se/Global/Webbokhandel/Dokument/2009/Bygg_f%C3%B6r_morgondagens_klimat.pdf> [2009-12-10] Karlskrona: Boverket
- Dimoudi, A. & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings* 35:69-76.
- Eliasson I., Knez, I., Westerberg, U., Thorsson, S., Lindberg, F., (2007). Climate and behaviour in a Nordic city. *Landscape and Urban Planning* 82: 72–84.
- Gay, L.W., Knoerr, K.R. & Braaten, M.O. (1971). Solar radiation variability on the floor of a pine plantation. *Agricultural Meteorology* 8: 39-50.
- Gehl, Jan (2001). *Life between buildings: using public space*. 5. uppl. Köpenhamn: The Danish Architectural Press
- Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, A.R. & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built environment* 33:115-133.
- Glaumann, Mauritz & Nord, Margitta (1993). *UteKlimat*. Alnarp: Sveriges lantbruksuniv.
- Glaumann, Mauritz & Westerberg, Ulla (1988). *Vind*. Solna: Svensk byggtjänst
- Hardy, J.P., Melloh, R., Koenig, G., Marks, D., Winstral, A., Pomeroy, J.W., Link, T. (2004). Solar radiation transmission through conifer canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 126:257–270.

- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* 43:71–75.
- Knapp AK & Carter GA. (1998). Variability in leaf optical properties among 26 species from a broad range of habitats. *American Journal of Botany*. 85: 940–946.
- Knez, I., Thorsson, S., Eliasson, I., & Lindberg, F. (2009) Psychological mechanisms in outdoor place and weather assessment: towards a conceptual model. *International Journal of Biometeorology* 53:101–111.
- Lachérade, S., Miesch C., Lemaître F., Briottet X., Le Men H., Boldo D., & Valorge C.(2005). Analysis of the spectral variability of urban materials for classification: A case study over Toulouse (France). *Proceedings of the ISPRS Joint Symposium URBAN05 and URS05*, 3 pp.
- Liakatas A, Proutsos N & Alexandris S (2002). Optical properties affecting the radiant energy of an oak forest. *Meteorological applications*.4:433-36.
- Lindberg, F. & Grimmond, C. S. B. (2011). The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theor Appl Climatol*. DOI 10.1007/s00704-010-0382-8.
- Liljequist, Gösta H. (1979). *Meteorologi: strålning*. Uppsala: Univ., meteorol. inst.
- Lindqvist, Sven, Mattsson, Jan O. & Holmer, Björn (1983). *Lokalklimatiska kartor för användning i kommunal översiktlig planering: en metodstudie*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning
- Mattsson, Jan O. (1979). *Introduktion till mikro- och lokalklimatologin*. 1. uppl. Malmö: LiberLäromedel
- Mattsson, Jan O., Lindqvist, Sven & Bärning, Lars (1986). *Stadsstruktur, bebyggelseförtätning, klimat: resultat av studier i Malmö, särskilt inriktade på temperaturförhållanden*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning
- Mayer, H., Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theor. Appl. Clim.* 38: 43–49.
- Myneni R B, Ross J & Asrar G. (1989). A review on the theory of photon transport in leaf canopies. *Agric For Meteorol.* 45: 1–153.
- Nikolopoulou, M. & Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings* 35: 95–101.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. 2. ed. London: Routledge
- Otto S. & Trautmann T. (2008). A note on G-functions within the scope of radiative transfer in turbid vegetation media. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 109:2813–2819.

Plan- och bygglag (1987) [Online, hemsida] (2010-01-07) Tillgänglig: <<http://www.riksdagen.se/webbnav/index.aspx?nid=3911&bet=1987:10>> Stockholm (SFS 1987:10) [2010-01-07]

Raven, Peter H., Evert, Ray Franklin & Eichhorn, Susan E. (1999). *Biology of plants*. 6. ed. New York: W.H. Freeman

Ross, Juhan (1981). The radiation regime and architecture of plant stands. The Hague: Dr W. Junk Publishers

SMHI (2007). Sveriges framtida klimat. [Online, hemsida] (2007-12-21) Tillgänglig: <<http://www.smhi.se/cmp/jsp/polopoly.jsp?d=8785&l=sv>> [2008-01-16]

SMHI (2009a). Normal solskenstid för ett år. [Online, hemsida] (2009-05-28) Tillgänglig: <<http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/stralning/1.3052>> [2011-05-13]

SMHI (2009b). Olika sorters strålning. [Online, hemsida] (2009-08-14) Tillgänglig: <<http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/olika-sorters-stralning-1.5930>> [2011-04-15].

SMHI (2009c). Vindens kyleffekt. [Online, hemsida] (2009-11-09) Tillgänglig: <<http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/vindens-kyleffekt-1.259>> [2010-01-06]

SMHI (2009d). Väderspråket. [Online, hemsida] (2009-06-24) Tillgänglig: <<http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/vaderspraket-1.3847>> [2011-05-09]

Spitters C.J.T., Toussaint H.A.J.M. & Goudriaan J.(1986). Separating the diffuse and direct component of global radiation and it implications for modelling canopy photosynthesis. Part I. Components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology* 88:217–229.

Statistisk årsbok för Sverige. (2011) Stockholm: SCB [PDF] Tillgänglig: <http://www.scb.se/Pages/Product____30923.aspx?Produktkod=OV0904&displaypublication_s=true> Väder. (2011-05-13)

Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., & Holmer, B. (2007). Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology* 27: 1983–1993.

Upmanis H., Eliasson I. & Lindqvist S. (1998). The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology* 18: 681–700

Urban Climate Group (2011) SOLWEIG – A climate design tool: User manual for version 2. [Online PDF] (2011-02-01) Tillgänglig: <http://www.gvc.gu.se/digitalAssets/1327/1327437_solweig_help.pdf> [2011-04-15]. Göteborg: Geovetenskap, Göteborgs Universitet.

Bilaga 1

Ordlista

Absorption - upptagande av något, tex. strålning

Advektion - horisontell lufttransport, dvs. vind

Albedo - reflektionsförmåga

Atmosfärisk admittans - förmåga att överföra värme mellan yta och luft

Diffus strålning - strålning som har brutits eller ändrat riktning på vägen från solen

Direkt strålning - strålning som kommer direkt från solen utan att ha ändrat riktning på vägen

Emission - avgivande av något, tex. strålning

Fotosyntetiskt aktiv strålning, PAR - strålning med våglängder mellan 380-710 nm, som växterna tar upp och använder i fotosyntesen

Fysiologiskt ekvivalent temperatur (physiological equivalent temperature, **PET**) - upplevd temperatur efter effekterna av strålning, fukt, vind, kläder, aktivitetsnivå, ålder mm

Himmelsexponeringsfaktor (eng sky view factor, **SVF**) - del av himlen som syns rakt upp från en plats och räknas ofta ut via foton med lins som kan fotografera i 180 graders vinkel

Irradians - strålning per ytenhet

Konduktion - Molekylär värmeledning

Konvektion - vertikal lufttransport, dvs. stigande varm luft eller sjunkande kall luft

Kortvågig strålning - strålning från solen med våglängderna 150-3000 nm

Långvågig strålning - värmestrålning, emitteras från föremål och partiklar och har våglängderna 3000-100 000 nm

Nära infraröd strålning, NIR - strålning med våglängder 710-4000 nm, i det lägre spannet av den infraröda strålningen

Pyranometer - instrument för att mäta intensiteten hos solstrålning.

Strålningstemperatur (mean radiant temperature, **MRT**) - medeltemperaturen hos omgivande ytor som golv, väggar, tak etc. och innefattar direkt solstrålning, diffus solstrålning, reflekterad strålning och långvågig strålning

Termisk admittans - förmåga att överföra värme till andra fasta partiklar eller föremål

Transmission - överföring/genomsläppning av t.ex. strålning

Urban värmeö - ett område i en stad (ibland hela innerstaden) som är varmare än dess omgivning